



OULUN YLIOPISTO  
UNIVERSITY of OULU

Prosessi- ja ympäristötekniikan osasto  
Säätötekniikan laboratorio

Diplomityö

## **Veden hapetuslaitteen prototyypin toimintaperiaatteen todentaminen ja hapetustehon määrittäminen**

Oulussa 8.1.2013

Tekijä: \_\_\_\_\_  
Petri Hietaharju

Työn valvoja: \_\_\_\_\_  
Kauko Leiviskä  
Professori

Työn ohjaaja: \_\_\_\_\_  
Ari Isokangas  
TkT

# OULUN YLIOPISTO

## Teknillinen tiedekunta

## Tiivistelmä opinnäytetyöstä

Osasto		Koulutusohjelma	
Prosessi- ja ympäristötekniikan osasto		Prosessitekniikka	
Tekijä		Työn valvoja	
Hietaharju Petri Juhani		Prof. Kauko Leiviskä	
Työn nimi			
Veden hapetuslaitteen prototyypin toimintaperiaatteen todentaminen ja hapetustehon määrittäminen			
Opintosuunta	Työn laji	Aika	Sivumäärä
TP	Diplomityö	tammikuu 2013	95
Tiivistelmä			
<p>Diplomityössä testattiin Happihyrrä Oy:n kehittämää veden hapetuslaitteen prototyyppiä. Tarkoitus oli todentaa laitteen toimintaperiaate sekä testata sen hapetusteho. Ennen varsinaisia kokeita hapensiirron teoriaan sekä ilmastuslaitteiden mittaamiseen perehdyttiin kirjallisuuden avulla.</p> <p>Hapetuslaite koostui akryylimuoviputkista sekä poretasosta. Laitteen hapetusteho perustuu ensimmäisessä osassa aikaan saatavaan ejektori-imuun ja pyörteeseen, joka hajotetaan toisessa osassa useaksi pienemmäksi pyörteeksi. Tämän jälkeen vesi kuplitetaan poretasossa.</p> <p>Kokeet suoritettiin Oulun yliopiston koehalliin rakennetulla testilaitteistolla. Testilaitteisto koostui kahdesta 1 m<sup>3</sup> muovisäiliöstä joista toinen asennettiin hallin lattiatasolle ja toinen hallin ylätasolle. Hapetuslaite asennettiin ennen alasäiliötä niin, että vesi ohjautui laitteelta ulos tullessaan säiliöön. Yläsäiliöstä rakennettiin venttiilillä varustettu putkiyhteys hapetuslaitteeseen. Alasäiliössä oli uppopumppu veden pumppaamista varten. Kokeet suoritettiin poistamalla liuenut happi vedestä natriumsulfiitilla ja laskemalla vesi yläsäiliöstä laitteen läpi alasäiliöön. Veden liuenneen hapen pitoisuus mitattiin ennen läpilaskua yläsäiliöstä ja läpilaskun jälkeen alasäiliöstä. Läpilaskuja jatkettiin kunnes veden liuenneen hapen pitoisuus saavutti kyllästyspitoisuuden.</p> <p>Hapetuslaitteen ejektori-imu ei toiminut. Tästä huolimatta laitteelle pystyttiin syöttämään paineilmaa ja hapetta kaasunjakorenkaan kautta. Hapen liukenemisen havaittiin tapahtuvan merkittävältä osalta alasäiliössä, johon vesi suihkusi putkesta suurella nopeudella. Tämä aiheutti veden voimakkaan sekoittumisen ja oli merkittävä tekijä hapen liukenemisessä. Paras hapensiirtonopeus saavutettiin laskemalla vettä tyhjällä putkella alasäiliöön, jolloin hapensiirtonopeus oli parhaimmillaan 45,1 kg/d. Toiseksi paras tulos saavutettiin asentamalla pyörresuppilo ja pyörteenohjain ja lisäämällä hapetta virtaavaan veteen pyörresuppilon kaasunjakorenkaan kautta jolloin hapensiirtonopeus oli 41,0 kg/d, mikä on noin 9 % pienempi kuin tyhjällä putkella.</p> <p>Tutkimuksen tulokset pätevät vain tutkimuslaitteistoa vastaavissa olosuhteissa. Mikäli laitteistokokonaisuus muuttuu, ei tuloksia voi suoraan siirtää uuteen ympäristöön. Onkin oltava erittäin tarkka johtopäätöksissä hapetuslaitteen soveltuvuudesta tutkimuslaitteistosta huomattavasti eroaviin kohteisiin.</p>			
Säilytyspaikka			
Tiedekirjasto Tellus			
Muita tietoja			

**UNIVERSITY OF OULU**  
**Faculty of Technology**

**Thesis Abstract**

Department Department of Process and Environmental Engineering		Degree Programme Process Engineering	
Author Hietaharju Petri Juhani		Thesis Supervisor Prof. Kauko Leiviskä	
Title of Thesis Testing of an aeration device prototype to confirm its operating principle and oxygen transfer capabilities			
Major Subject TP	Type of Thesis Master's Thesis	Submission Date January 2013	Number of Pages 95
<p>Abstract</p> <p>Subject of this Master's Thesis was to test a prototype of an aeration device developed by Happihyrää Oy. The aim was to confirm its operating principle and to test its oxygen transfer capabilities. Before the tests, the theory and measurement of oxygen transfer were studied.</p> <p>The aeration device was comprised of acryl plastic tubes and a bubbling section. The operating principle of the device is to create a strong vortex and to suck air or oxygen through the ejectors in the first section and then disperse the vortex into multiple smaller ones in the second section. Afterwards water is bubbled in the bubbling section.</p> <p>Tests were performed with testing equipment built at Oulu University. The testing equipment comprised of two 1 m<sup>3</sup> plastic tanks of which one was installed at the ground level and the other one at the high level of the hall. The aeration device was installed before the ground level tank so that water would be directed into the tank after going through the device. The pipe connection with a valve was constructed from the high level tank to the aeration device. A submersible pump was installed in the ground level tank. Tests were performed by deoxygenating water with sodium sulfite and running it from the high level tank into the ground level tank through the aeration device. The amount of dissolved oxygen was measured from the high level tank before releasing water and from the ground level tank after water had come through the device. Water was run through the device so many times until saturation concentration was reached.</p> <p>The ejectors of the aeration device didn't work. Despite that pressurized air and oxygen could be injected to the water flow through a connection for a gas supply. It was discovered that the dissolution of oxygen was mainly happening in the ground level tank. The high velocity of water spurting out of the device and into the tank caused intense turbulent mixing and was significant contributor to the dissolution of oxygen. Highest oxygen transfer rate was 45.1 kg/d achieved by running water through an empty pipe into the ground level tank. Second highest oxygen transfer rate was 41.0 kg/d which was achieved when the aeration device was installed and pure oxygen was fed into the water flow. This was 9 % smaller than the highest oxygen transfer rate.</p> <p>The findings are only valid in conditions similar to the testing equipment used. If the conditions change, the results cannot be directly applied. Therefore one has to be very careful when making conclusions about the applicability of the aeration device for significantly different conditions.</p>			
Place of Storage University of Oulu, Science Library Tellus			
Additional Information			

# Sisällysluettelo

Tiivistelmä.....	2
Abstract.....	3
1 Johdanto .....	7
2 Hapensiirron teoriaa .....	9
2.1 Kaksoisfilmiteoria .....	10
2.2 Muut teoriat .....	14
2.2.1 Tunkeutumisteoria.....	14
2.2.2 Pinnanuuksiutumisteoria .....	15
2.2.3 Yhdistelmä filmi- ja pinnanuuksiutumisteorioista .....	15
2.2.4 Rajakerrosteoria .....	15
3 Hapensiirtoon vaikuttavat tekijät .....	17
3.1 Hapen liukoisuus.....	17
3.1.1 Lämpötila ja paine.....	18
3.1.2 Epäpuhtaudet.....	21
3.2 Kokonaishapensiirtokerroin $K_{La}$ .....	25
3.2.1 Lämpötila .....	25
3.2.2 Pinta-aktiiviset aineet .....	25
3.2.3 Muut epäpuhtaudet.....	28
3.2.4 Sekoitus ja turbulenssi .....	29
3.2.5 Laitteisto.....	30
4 Hapensiirron mittaaminen.....	32
4.1 Korjauskertoimet.....	32
4.1.1 Lämpötila- ja painekorjauskertoimet hapen liukoisuudelle .....	32
4.1.2 Lämpötilakerroin kokonaishapensiirtokertoimelle .....	33
4.1.3 $\alpha$ ja $\beta$ .....	34
4.2 Ilmastuslaitteiston tunnusluvut .....	37

4.3 Mittaaminen puhtaassa vedessä .....	39
4.3.1 Epälineaarinen regressioanalyysi .....	39
4.3.2 Logaritminen menetelmä .....	40
4.4 Mittaaminen jätevedessä .....	40
4.5 Mittaaminen prosessiolosuhteissa .....	41
4.5.1 Vakiohappipitoisuuteen perustuva menetelmä .....	42
4.5.2 Muuttuvan happipitoisuuden menetelmä .....	42
4.5.3 Merkkiainemenetelmä .....	43
4.5.4 Poistokaasumenetelmä .....	44
5 Ilmastuksen vaikutus veteen liuenneille aineille .....	45
5.1 Hajut ja maut .....	45
5.2 Rauta ja mangaani .....	45
5.3 Hiilidioksidi .....	47
5.4 Rikkivety .....	49
5.5 VOC .....	49
5.6 Metaani .....	50
5.7 Radon .....	51
5.8 Arseeni .....	51
6 Ilmastuslaitteistot .....	53
6.1 Painovoimaisesti toimivat ilmastimet .....	53
6.2 Diffuusio- eli kuplailmastimet .....	54
6.3 Mekaaniset ilmastimet .....	54
6.4 Paineilmastimet .....	55
7 Tutkimus .....	56
7.1 Laitteisto .....	56
7.2 Kokeiden suoritus ja mittaukset .....	58
7.2.1 Kemikaalien lisääminen .....	59
7.2.2 Liuenneen hapen mittaaminen .....	60

7.2.3 Veden ja ilman lämpötilan sekä ilmanpaineen mittaaminen.....	60
7.2.4 pH:n ja sähkönjohtavuuden mittaaminen.....	60
7.2.5 Ilma- ja happivirran mittaaminen.....	61
7.2.6 Veden laatu.....	61
7.2.7 Veden tarkkailu .....	61
7.2.8 Läpilaskuajan mittaaminen .....	62
7.3 Suoritetut kokeet .....	62
7.3.1 Laitteiston käyttöönotto .....	62
7.3.2 Kokeet .....	63
7.4 Tulokset.....	64
8 Tulosten tarkastelu .....	69
8.1 Hapensiirtonopeus.....	69
8.2 Läpilaskukertojen vaikutus .....	71
8.3 Ilmastustehokkuus.....	73
8.4 Hapensiirtotehokkuus.....	74
8.5 Veden lämpötila, ilmanpaine ja liuenneen hapen kyllästyspitoisuus.....	75
8.6 Sähkönjohtavuus ja TDS.....	78
8.7 pH.....	80
8.8 Virhelähteet .....	81
9 Johtopäätökset.....	84
10 Yhteenveto .....	86
11 Lähdeluettelo.....	88

# 1 Johdanto

Ilmastus on prosessi, jossa kaasun ja nesteen välistä pinta-alaa kasvatetaan, mikä parantaa faasien välistä aineensiirtoa. Ilmastuksen tarkoituksena on liuottaa nesteeseen kaasuja (absorptio), yleensä happea, tai poistaa siihen jo liuenneita kaasuja (desorptio) tai muita epäpuhtauksia. Toiminta perustuu diffuusioon eli ilmiöön, jossa aineen pitoisuuden ero eri faaseissa saa aikaan aineen siirtymisen pienemmän pitoisuuden suuntaan.

Hapen lisääminen veteen voidaan toteuttaa joko lisäämällä ilmaa tai happea suoraan veteen tai vesi voidaan suihkuttaa ilmaan pisaroina. Kummassakin tapauksessa veden ja kaasun välistä pinta-alaa pyritään kasvattamaan, jolloin hapensiirto tehostuu. (Metcalf & Eddy, 2003, 425)

Ilmastuksella voi olla monia tavoitteita: (Dyksen, 2005, 5.1; RIL, 2004, 366-367; Sincero & Sincero, 2003, 419-420; AWWA, 2010, 369)

- veden maun ja/tai hajun parantaminen,
- raudan ja/tai mangaanin hapettaminen,
- hiilidioksidin, rikkivedyn, haihtuvien orgaanisten yhdisteiden (VOC eli volatile organic compounds), metaanin ja/tai radonin poisto ja
- mikrobien hapensaannin varmistaminen jätevedenkäsittelyssä (esim. aktiivilieteprosessi).

Liuenneen hapen määrän kasvattaminen vedessä voi myös itsessään olla syy ilmastukseen. Esimerkiksi tietty määrä happea juomavedessä parantaa sen makua. Liian suuri liuenneen hapen määrä kuitenkin tekee veden korrodoivaksi. (AWWA, 2010, 373) Myös järviä hapetetaan yleisesti kunnostustarkoituksessa (Lappalainen & Lakso, 2005). Luonnon vesissä happi on tärkeä tekijä vesistön eliöstön hyvinvoinnin kannalta. Vedessä elävät mikrobit ja kalat tarvitsevat happea elääkseen ja riittävän hapen saannin turvaamisella edistetään koko vesistön hyvinvointia.

Yleensä ilmastimet tarvitsevat energiaa toimintaansa. Mekaaniset ilmastimet tarvitsevat sitä moottorin pyörittämiseen ja diffuusioilmastimet ilman puhaltamiseen. (Metcalf & Eddy, 2003, 430-448) Tämän työn tarkoitus oli testata painovoimaa hyväksi käyttävän Happihyrrä Oy:n kehittämän ilmastuslaitteen hapetusteho ja tutkia sen suorituskykyä.

Laite koostuu putkeen asennettavista osista eikä se vaadi ulkopuolista energiaa. Sen toiminta perustuu painovoiman avulla aikaan saatavaan ejektori-imuun, jolla happi tuodaan veteen. Lisäksi laitteeseen kuuluu porelevy, johon painovoiman avulla kiihdytetty vesi iskeytyy. Porelevyistä voidaan rakentaa turbiini, joka tuottaa sähköä.

Työ koostuu teoriaosuudesta ja kokeellisesta osasta. Teoriaosuudessa perehdytään yleisesti hapensiirron teoriaan ja hapensiirtoon vaikuttaviin tekijöihin. Lisäksi selvitetään hapensiirron mittaamista, sen vaikutusta veteen liuenneille aineille sekä lyhyesti erilaisia ilmastuslaitteistoja. Kokeellista osaa varten laitteesta rakennettiin prototyyppi akryylimuovista ja alumiinista. Prototyypin testausta varten rakennettiin testilaitteisto, jolla laitteen toimintaa arvioitiin ja hapensiirtoteho mitattiin.



## 2 Hapensiirron teoriaa

Happi siirtyy veteen diffuusiolla, jossa aineensiirto tapahtuu suuremmasta pitoisuudesta pienempään. Molekylaarisen diffuusion nopeus kaasun ja nesteen rajapinnalla riippuu kaasun ja nesteen ominaisuuksista, lämpötilasta, aineen pitoisuuserosta sekä pinta-alasta, jonka läpi diffuusio tapahtuu (Eckenfelder, 2000, 158). Diffuusiolle voidaan kirjoittaa Fickin lain mukainen yhtälö (1) seuraavasti: (Metcalf & Eddy, 2003, 245)

$$r = -D \frac{dC}{dx} \quad (1)$$

missä  $r$  on aineensiirtonopeus pinta-alaa kohti aikayksikössä,  
 $D$  on molekylaarinen diffuusiovakio,  
 $C$  on aineen pitoisuus ja  
 $x$  on välimatka.

Yhtälön (1) mukaisesti aineensiirtonopeus on suoraan verrannollinen diffuusiovakioon  $D$  sekä pitoisuuden  $C$  muutokseen  $x$ :n suunnassa. Miinusmerkki kertoo aineensiirron tapahtuvan pienemmän pitoisuuden suuntaan. Diffuusiovakio riippuu mm. aineesta, lämpötilasta, paineesta ja pitoisuudesta. (Treybal, 1968, 17)

Molekylaarisen diffuusion voidaan yksinkertaisesti ajatella tapahtuvan niin, että aineen molekyylit liikkuvat suoraan tasaisella nopeudella diffuusion suuntaan, kunnes törmäävät toiseen molekyyliin, jolloin niiden nopeus ja suunta muuttuvat. Tämä aiheuttaa sen, että molekyylit liikkuvat hyvin mutkittelevaa reittiä ja siksi molekyyliin kulkema matka diffuusion suuntaan on vain pieni osa niiden kulkemasta kokonaismatkasta. Tämän vuoksi diffuusio on hidasta. Lämpötilaa nostamalla ja painetta laskemalla voidaan diffuusiota kuitenkin nopeuttaa. Lämpötilan nousu lisää molekyyliin liikkuvuutta ja paineen lasku vähentää molekyyliin törmäyksien määrää. (Treybal, 1968, 15)

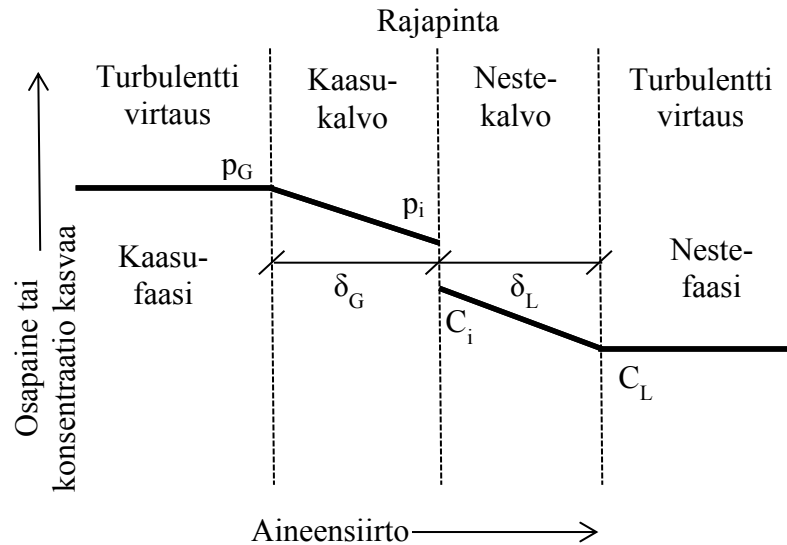
Vaikka diffuusio onkin hidas tapahtuma, se johtaa lopulta aineiden tasaiseen pitoisuuteen koko seoksessa. Jos esimerkiksi 1,5 metriä syvään altaaseen laitetaan pohjalle puoli allasta suolavettä ja sen päälle asetetaan varovasti sama määrä puhdasta vettä, niin ettei sekoitusta tapahdu, kestää pelkällä diffuusiolla 10 vuotta saavuttaa 87,5

prosentin ja 28 vuotta 99 prosentin suolapitoisuus pintavedessä. Sekoituksella tätä voidaan kuitenkin nopeuttaa ja täydellinen sekoittuminen saavuttaa noin 30 sekunnissa. Pitoisuus saadaan siis tasoittumaan huomattavasti nopeammin sekoituksella, joka saa aikaan pyörteitä, jotka kuljettavat aineita mukanaan. Tätä kutsutaan turbulenttiseksi diffuusioksi molekylaarisen diffuusion sijaan. Kuitenkin sekoituksessakin molekylaarinen diffuusio on aina perimmäinen aineensiirtoilmiö. (Treybal, 1968, 16)

Vaikka yhtälössä (1) pitoisuuden muutos esitetään diffuusion aiheuttavana tekijänä, on kuitenkin havaittu, että kahdesta eri faasista koostuvassa systeemissä aineen pitoisuus tasapainotilassa ei välttämättä ole sama molemmissa faaseissa. Aineen aktiivisuus tai kemiallinen potentiaali sitä vastoin on sama kummassakin faasissa. (Treybal, 1968, 16) Tämä johtuu ionien välisistä vuorovaikutuksista, jotka tulevat merkittäviksi, kun aineen pitoisuus seoksessa on yli  $0,1 \text{ mol/dm}^3$ . Tällöin mitattu pitoisuus ei enää pidä paikkaansa, vaan on otettava käyttöön aktiivisuus, joka ilmoitetaan myös pitoisuutena, mutta se ottaa huomioon ionien väliset vuorovaikutukset. (Housecroft & Sharpe, 2012) Todellisuudessa aineen aktiivisuus on siis varsinainen diffuusion aiheuttaja. Yleensä diffuusion kuvaamiseen käytetään kuitenkin aineiden pitoisuuseroja niiden helpomman havaittavuuden takia. (Treybal, 1968, 16-17)

## 2.1 Kaksoisfilmiteoria

Kaasun ja nesteen välistä aineensiirtoa on tutkittu paljon ja useita eri teorioita sen mekanismien selittämiseksi on ehdotettu. Lewiksen ja Whitmanin (1924) esittämä kaksoisfilmiteoria on yksinkertaisin ja suosituin. Suurimmassa osassa tilanteista sillä saadaan samanlaisia tuloksia kuin monimutkaisemmilla teorioilla (Metcalf & Eddy, 2003, 285). Kuvassa 1 on esitetty kaksoisfilmiteorian periaate, kun aineensiirto tapahtuu kaasufaasista nestefaasiin. Periaate on sama kumpaankin suuntaan.



**Kuva 1.** Kaksoisfilmiteorian periaatekuva, kun aineensiirto tapahtuu kaasufaasista nestefaasiin (Metcalf & Eddy, 2003, 285).

Kaksoisfilmiteorian mukaan kaasun ja nesteen rajapinnalle muodostuu kaksi kalvoa, jotka vastustavat kaasumolekyylien siirtymistä faasien välillä. Teorian oletuksena on, että neste- ja kaasufaasit ovat täydellisesti sekoittuneita eikä niillä ole vaikutusta aineensiirtonopeuteen, vaan kaikki vastustus diffuusiolle aiheutuu kalvoista. Fickin lain mukaisen yhtälön (1) perusteella voidaan aineensiirrolle tasapainotilassa kirjoittaa yhtälö (2) seuraavasti: (Metcalf & Eddy, 2003, 285-286)

$$r = k_L(C_i - C_L) = k_G(p_G - p_i) \quad (2)$$

missä  $k_L$  on aineensiirtokerroin nestekalvossa,  
 $k_G$  on aineensiirtokerroin kaasukalvossa,  
 $C_i$  on aineen kyllästyspitoisuus rajapinnalla tasapainotilassa aineen osapaineen  $p_i$  kanssa,  
 $C_L$  on aineen pitoisuus nestefaasissa,  
 $p_G$  on aineen osapaine kaasufaasissa ja  
 $p_i$  on aineen osapaine rajapinnalla tasapainotilassa aineen kyllästyspitoisuuden  $C_s$  kanssa.

Yhtälön (2) termit  $(C_i - C_L)$  ja  $(p_G - p_i)$  kuvaavat aineen pitoisuus- ja osapaine-eroja neste- ja kaasukalvojen läpi ja ne saavat aikaan aineen siirtymisen nestefaasiin tai

kaasufaasiin. Aineensiirtokertoimet  $k_L$  ja  $k_G$  kuvaavat kalvojen aiheuttamaa vastustusta diffuusiolle ja ne riippuvat diffuusiovakiosta  $D$  sekä kalvojen paksuudesta ( $\delta_G$  ja  $\delta_L$ ). Kalvojen paksuutta pienentämällä voidaan aineensiirtokertoimia kasvattaa. Nestekalvon paksuutta voidaan pienentää nesteen sekoituksella ja kaasukalvon paksuutta antamalla kaasun virrata nopeammin nestepinnan ohi. Myös lämpötilalla on vaikutusta kalvojen paksuuteen. Lämpötilan noustessa nestekalvon paksuus pienenee, kun taas kaasukalvon on havaittu tulevan paksummaksi. (Lewis & Whitman, 1924)

Kalvon pienentämisen vaikutus aineensiirtonopeuteen ei kuitenkaan välttämättä ole suoraan positiivinen, vaan se riippuu siitä, kumpi kalvoista määrittelee aineensiirtonopeuden (Lewis & Whitman, 1924). Yhtälössä (2) käytettyjen aineensiirtokertoimien  $k_L$  ja  $k_G$  sijasta käytetäänkin yleensä kokonaisaineensiirtokertoimia  $K_L$  tai  $K_G$ , riippuen siitä, kumpi kalvo määrittelee aineensiirtonopeuden. Nestekalvon ollessa aineensiirtonopeuden määrittävä tekijä, voidaan aineensiirtonopeus kirjoittaa yhtälön (3) muotoon: (Metcalf & Eddy, 2003, 286)

$$r = K_L(C_S - C_L) \quad (3)$$

missä  $K_L$  on kokonaisaineensiirtokerroin ja  $C_S$  on aineen kyllästyspitoisuus rajapinnalla tasapainotilassa aineen osapaineen kanssa.

Se, kumpi kalvo määrittelee aineensiirtonopeuden, riippuu kaasun liukoisuudesta, mikä yhtälössä (4) esitetyn Henryn lain mukaisesti on suoraan verrannollinen kaasun osapaineeseen. Henryn lain vakion arvo riippuu kaasun tyypistä, lämpötilasta sekä veden epäpuhtauksista. (RIL, 2003, 214; Metcalf & Eddy, 2003, 66-69; Eckenfelder, 2000, 160)

$$C_S = \frac{1}{H}p \quad (4)$$

missä  $H$  on Henryn lain vakio ja  $p$  on kaasun osapaine kaasufaasissa.

Ottamalla huomioon Henryn lain mukainen vaikutus kaasun liukoisuuteen, voidaan kokonaisaineensiirtokertoimille  $K_L$  ja  $K_G$  johtaa yhtälöiden (2), (3) ja (4) avulla yhtälöt (5) ja (6). Kokonaisaineensiirtokertoimien suhde toisiinsa on esitetty yhtälössä (7). (Metcalf & Eddy, 2003, 286-287)

$$\frac{1}{K_L} = \frac{1}{k_L} + \frac{1}{Hk_G} \quad (5)$$

$$\frac{1}{K_G} = \frac{1}{k_G} + \frac{H}{k_L} \quad (6)$$

$$K_L = HK_G \quad (7)$$

Kokonaisaineensiirtokertoimet  $K_L$  ja  $K_G$  siis riippuvat sekä neste- että kaasukalvon hapensiirtokertoimista  $k_L$  ja  $k_G$ . Yhtälöistä (5) ja (6) voidaan kuitenkin nähdä, kuinka niukkaliukoisille eli suuren vakion  $H$  omaaville kaasuille, kuten happi tai hiilidioksidi, nestekalvo määrittää aineensiirtonopeuden. Vastaavasti pienen  $H$ :n arvon omaaville suuriliukoisille kaasuille, kuten ammoniakki, kaasukalvo on aineensiirtonopeuden määrittävä tekijä. Näiden välissä  $H$ :n arvoiltaan sijaitsevilla kaasuilla, kuten rikkivedyllä, tulee ottaa huomioon molempien kalvojen vaikutus. (Metcalf & Eddy, 2003, 287)

Happi on niukkaliukoinen kaasu, joten nestekalvo määrittää sen aineensiirtonopeuden. Yhtälö (3) voidaan nyt muokata yhtälön (8) mukaiseksi kertomalla se hapensiirtopinta-alalla  $A$  ja jakamalla tilavuudella  $V$ . Nyt saadaan hapensiirtonopeus pitoisuusyksiköissä: (Eckenfelder, 2000, 159)

$$r_v = \frac{dC}{dt} = K_L \frac{A}{V} (C_S - C_L) = K_L a (C_S - C_L) \quad (8)$$

missä  $r_v$  on hapensiirtonopeus tilavuutta kohti aikayksikössä,  
 $dC/dt$  on pitoisuuden muutos aikayksikköä kohti,  
 $A$  on pinta-ala, jonka läpi hapensiirto tapahtuu,  
 $V$  on vesimäärän tilavuus ja  
 $K_L a$  on kokonaishapensiirtokerroin.

Yhtälöstä (8) voidaan nähdä, kuinka  $C_L$ :n lähestyessä  $C_S$ :ää hapensiirtonopeus hidastuu. Hapensiirto on siis nopeinta, kun veteen ei ole liuennut lainkaan happea. Lisäksi voidaan havaita, että ominaispinta-alan  $A/V$ , eli kaasun ja veden välisen kontaktipinnan, tulisi olla mahdollisimman suuri, sillä hapensiirtonopeus on suoraan verrannollinen siihen. Pinta-alaa  $A$  ei kuitenkaan yleensä tiedetä ja sen määrittäminen on hankalaa. Suhdetta  $A/V$  merkitäänkin pienellä  $a$ :lla, mikä yhdessä  $K_L$ :n kanssa muodostaa kokonaishapensiirtokertoimen  $K_{La}$ .  $K_{La}$  riippuu ilmastuslaitteistosta sekä veden laadusta ja se määritetään yleensä kokeellisesti (Metcalf & Eddy, 2003, 288).

## 2.2 Muut teoriat

Kaksoisfilmitheoriassa kaasun ja nesteen rajapinnalle muodostuvien kalvojen oletetaan olevan muuttumattomassa tilassa (Lewis & Whitman, 1924). Lisäksi oletetaan, että  $k_L$  on suoraan verrannollinen  $D$ :hen. Kokeellisesti on kuitenkin havaittu, ettei tämä pidä paikkaansa turbulenttisissa olosuhteissa, vaan  $k_L \propto D^n$ , jossa  $n$  voi olla väliltä 0 – 0,9.  $k_L$ :n ja  $D$ :n väliselle yhteydelle on kehitetty useita erilaisia teorioita, joita käsitellään seuraavissa kappaleissa. (Treybal, 1968, 49-54)

### 2.2.1 Tunkeutumisteoria

Tunkeutumisteoria lähtee ajatuksesta, että aika aineensiirron tapahtumiselle on useissa tapauksissa lyhyt eikä kaasun ja nesteen rajapinnalle ehdi muodostua kaksoisfilmitheorian mukaista pitoisuusgradienttia. Nestepartikkelin voidaan ajatella olevan kosketuksissa nousevan ilmakuplan kanssa vain sen ajan, mikä kuplalta kestää nousta oman halkaisijansa pituinen matka. Toinen tapa havainnollistaa asiaa on ajatella sekoituksen aiheuttamien nestepyörteiden kulkeutuvan kaasun ja nesteen rajapinnalle, jossa ne viipyvät tietyn ajan ennen kuin palaavat takaisin nestebulkkiin. Molemmissa tapauksissa kontaktiajan oletetaan olevan vakio. Aineensiirtokertoimelle  $k_L$  voidaan edellä esitetyn pohjalta johtaa yhtälö (9), jonka mukaisesti  $k_L$  on suoraan verrannollinen  $D$ :n neliöjuureen. (Treybal, 1968, 50-52)

$$k_L = 2 \sqrt{\frac{D}{\pi t}} \quad (9)$$

missä  $t$  on kaasun ja nesteen välinen kontaktiaika.

### 2.2.2 Pinnan uusiutumisteoria

Danckwertsin (1951) esittämässä pinnan uusiutumisteoriassa tunkeutumisteorian mukaisen kontaktiajan oletetaan vaihtelevan. Sekoituksen aiheuttamat nestepyyrteet kulkeutuvat nesteen ja kaasun rajapinnalle uudistaen aineensiirtopintaa ja vieden samalla mukanaan eri aikoja rajapinnalla ollutta nestettä. Teorian mukainen aineensiirtokerroin  $k_L$  on esitetty yhtälössä (10), josta nähdään  $k_L$ :n olevan suoraan verrannollinen  $D$ :n neliöjuureen kuten tunkeutumisteoriassa, mutta kontaktiajan sijaan käytössä on termi  $s$ , joka kuvaa aineensiirtopinta-alan uusiutumisenopeutta.

$$k_L = \sqrt{Ds} \quad (10)$$

missä  $s$  on aineensiirtopinta-alan uusiutumisenopeus.

### 2.2.3 Yhdistelmä filmi- ja pinnan uusiutumisteorioista

Sekä tunkeutumis- että pinnan uusiutumisteoriassa  $k_L \propto D^{0,5}$ , mutta, kuten aiemmin mainittiin, eksponentin  $n$  on havaittu vaihtelevan välillä  $0 - 0,9$ . Yhtälö (11), joka on kehitetty pinnan uusiutumisteorian pohjalta, mahdollistaa  $n$ :lle arvot väliltä  $0,5 - 1$ . Mikäli  $s$  on pieni (pinnan uusiutumista ei ole ja kalvot ovat muuttumattomassa tilassa) tai  $D$  on suuri,  $k_L$  saa kaksoisfilmiteorian mukaisen muodon ja  $n$  on 1. Jos taas  $D$  on pieni tai  $s$  on suuri, noudattaa  $k_L$  yhtälöä (10) ja  $n$  on tällöin 0,5. (Treybal, 1968, 53-54)

$$k_L = \sqrt{Ds} \coth \sqrt{\frac{s\delta_L^2}{D}} \quad (11)$$

### 2.2.4 Rajakerrosteoria

Rajakerrosteoriassa fluidin oletetaan virtaavan kiinteän aineen ohi ja siksi fluidin virtausnopeus rajapinnalla on nolla. Rajapinnan läheisyyteen muodostuu nopeusgradientin mukainen rajakerros, jonka alkupäässä virtaus on laminaarista ja loppupäässä turbulენტtista. Tämä muuttaa tilannetta verrattuna edellisiin teorioihin ja johtaa huomattavasti monimutkaisempiin yhtälöihin. Kun kiinteän aineen oletetaan

liukenevan nesteeseen, voidaan  $k_L$ :n ja  $D$ :n välille laminaarisen virtauksen alueella johtaa yhteys, jonka mukaan  $k_L \propto D^{2/3}$ . (Treybal, 1968, 54-55)



### 3 Hapensiirtoon vaikuttavat tekijät

Kuten osassa 2 hapensiirron teoriaa käsiteltäessä tuli ilmi, monet tekijät vaikuttavat hapensiirtonopeuteen. Se riippuu mm. liuenneen hapen määrästä, lämpötilasta, paineesta, epäpuhtauksista, aineensiirtopinta-alasta, sekoituksesta ja ilmastuslaitteistosta. Tässä osassa käsitellään näiden eri tekijöiden vaikutuksia yhtälön (8) mukaiseen kokonaishapensiirtokertoimeen  $K_L$  ja sekä kyllästyspitoisuuteen  $C_S$ .

#### 3.1 Hapen liukoisuus

Hapen kyllästyspitoisuudella veteen tarkoitetaan sitä hapen määrää, joka voi tietyissä olosuhteissa liueta veteen. Poikkeamaa tästä pitoisuudesta kutsutaan kyllästysvajaukseksi (RIL, 2003, 215). Hapensiirtonopeudelle johdetussa yhtälössä (8) kyllästysvajausta merkittiin termillä  $(C_S - C_L)$  ja sillä on merkittävä vaikutus hapensiirtonopeuteen.

Kaksoisfilmi teoriaa käsiteltäessä tuli jo ilmi, kuinka hapen liukoisuus veteen noudattaa yhtälössä (4) esitettyä Henryn lakia, jonka mukaan kaasun liukoisuus on suoraan verrannollinen sen osapaineeseen. Lisäksi liukoisuus riippuu Henryn lain mukaisesta vakioista  $H$ , mikä taas riippuu kaasusta, lämpötilasta ja veden epäpuhtauksista. (Metcalf & Eddy, 2003, 66-69) Hapen liukoisuus veteen on siis riippuvainen monesta asiasta.

Seuraavaksi esitettävien hapen liukoisuustaulukoiden lisäksi kirjallisuudesta löytyy useita muita taulukoita (Kepenyes & Váradi, 1984; Eckenfelder, 2000, 160; RIL, 2003, 215); Sincero & Sincero, 2003, 432), joissa kaikissa hapen liukoisuus on hieman erilainen, mikä johtuu taulukon lähteenä käytetystä mittausdatasta. Lisäksi Bahadori ja Vuthaluru (2010) ovat kehittäneet yksinkertaisen Arrhenius-tyyppisen yhtälön, jolla hapen kyllästyspitoisuus voidaan laskea eri lämpötiloissa ja eri kloridipitoisuuksilla. Sen avulla lasketut kyllästyspitoisuudet vastaavat kirjallisuudesta löytyviä arvoja 3 prosentin tarkkuudella. Paineen vaikutusta yhtälö ei kuitenkaan ota huomioon.

Boyle et al. (1973) osoittivat väärin valitulla kyllästyspitoisuuden arvolla olevan merkittävä vaikutus hapensiirtonopeuteen. Heidän mukaansa taulukkoarvot eivät aina johda vääriin tuloksiin, mutta tulisi kuitenkin varmistaa kokeellisesti, voidaanko taulukkoarvoja käyttää kyseisissä olosuhteissa ja kyseisellä ilmastuslaitteistolla.

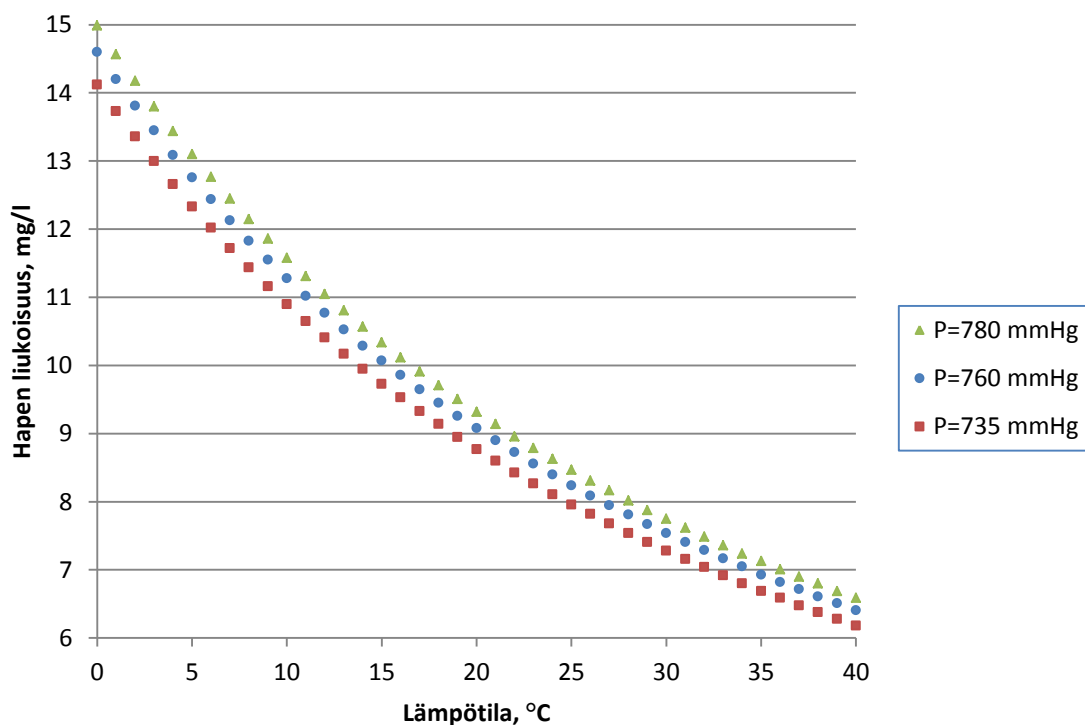
American Society of Civil Engineersin (ASCE, 2007) mukaan 1 prosentin pienempi kyllästyspitoisuuden arvo johtaa hapensiirtonopeutta laskettaessa 3 prosenttia todellista suurempaan tulokseen. Heidän mukaansa hapen kyllästyspitoisuuden arvoa ei tulisi määrittää taulukoiden perusteella tai arvioida yrittäen ottaa huomioon eri muuttujia, vaan se tulisi määrittää kokeellisesti.

### ***3.1.1 Lämpötila ja paine***

Metcalfin & Eddyn (2003) listaamat hapen liukoisuudet veteen eri lämpötiloissa ja ilmanpaineissa on esitetty taulukossa 1. He ovat käyttäneen lähteenä Coltin (1984) laskemia liukoisuuden arvoja. Taulukosta voidaan nähdä, kuinka hapen liukoisuus veteen pienenee lämpötilan noustessa. Ilmanpaineen kasvu taas parantaa liukoisuutta. Lämpötilalla voidaan havaita olevan merkittävämpi vaikutus hapen liukoisuuteen kuin ilmanpaineella. Lämpötilan ja ilmanpaineen vaikutusta on vielä havainnollistettu kuvassa 2.

**Taulukko 1.** Hapen liukoisuus veteen eri lämpötiloissa ja ilmanpaineissa (Metcalf & Eddy, 2003, 1747-1748).

Lämpötila (°C)	Hapen liukoisuus (mg/l)									
	Ilmanpaine (mmHg)									
	735	740	745	750	755	760	765	770	775	780
0	14,12	14,22	14,31	14,41	14,51	14,60	14,70	14,80	14,89	14,99
2	13,36	13,45	13,54	13,63	13,72	13,81	13,90	14,00	14,09	14,18
4	12,66	12,75	12,83	12,92	13,01	13,09	13,18	13,27	13,35	13,44
6	12,02	12,11	12,19	12,27	12,35	12,44	12,52	12,60	12,68	12,77
8	11,44	11,52	11,60	11,67	11,75	11,83	11,91	11,99	12,07	12,15
10	10,90	10,98	11,05	11,13	11,20	11,28	11,35	11,43	11,50	11,58
12	10,41	10,48	10,55	10,62	10,69	10,77	10,84	10,91	10,98	11,05
14	9,95	10,02	10,09	10,16	10,23	10,29	10,36	10,43	10,50	10,57
16	9,53	9,59	9,66	9,73	9,79	9,86	9,92	9,99	10,06	10,12
18	9,14	9,20	9,26	9,33	9,39	9,45	9,52	9,58	9,64	9,71
20	8,77	8,83	8,89	8,95	9,02	9,08	9,14	9,20	9,26	9,32
22	8,43	8,49	8,55	8,61	8,67	8,73	8,79	8,84	8,90	8,96
24	8,11	8,17	8,23	8,29	8,34	8,40	8,46	8,51	8,57	8,63
26	7,82	7,87	7,93	7,98	8,04	8,09	8,15	8,20	8,26	8,31
28	7,54	7,59	7,65	7,70	7,75	7,81	7,86	7,91	7,97	8,02
30	7,28	7,33	7,38	7,44	7,49	7,54	7,59	7,64	7,69	7,75
32	7,04	7,09	7,14	7,19	7,24	7,29	7,34	7,39	7,44	7,49
34	6,80	6,85	6,90	6,95	7,00	7,05	7,10	7,15	7,20	7,24
36	6,59	6,63	6,68	6,73	6,78	6,82	6,87	6,92	6,97	7,01
38	6,38	6,43	6,47	6,52	6,56	6,61	6,66	6,70	6,75	6,80
40	6,18	6,23	6,27	6,32	6,36	6,41	6,46	6,50	6,55	6,59

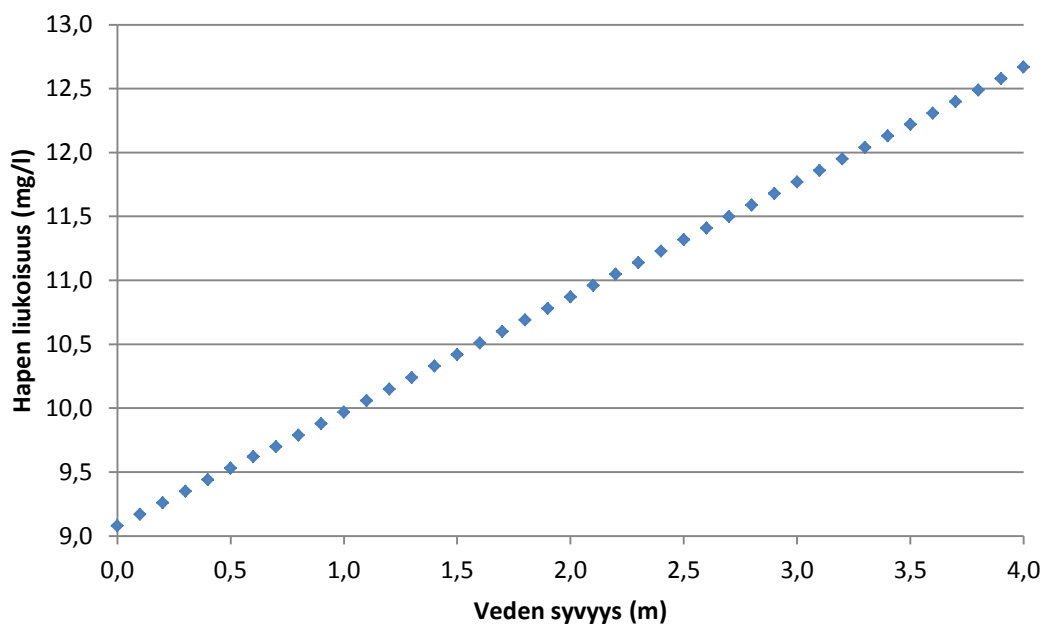


**Kuva 2.** Lämpötilan ja ilmanpaineen vaikutus hapen liukoisuuteen veteen (Metcalf & Eddy, 2003, 1747-1748).

Ilmanpaineen lisäksi myös hydrostaattinen paine vaikuttaa hapen liukoisuuteen. Syvemmälle mentäessä paine kasvaa ja se vaikuttaa hapen liukoisuuteen ilmanpaineen tavoin. Taulukossa on esitetty hapen liukoisuuden muutos veden syvyyden kasvaessa. Lisäksi kuvasta 3 voidaan nähdä liukoisuuden kasvavan lineaarisesti syvyyden kasvaessa.

**Taulukko 2.** Hapen liukoisuus veteen eri syvyyksissä (veden lämpötila on +20 °C ja ilmanpaine 760 mmHg) (Colt, 1984, 47).

Syvyys (m)	Hapen liukoisuus (mg/l)	Syvyys (m)	Hapen liukoisuus (mg/l)
0,0	9,08	2,5	11,32
0,5	9,53	3,0	11,77
1,0	9,97	3,5	12,22
1,5	10,42	4,0	12,67
2,0	10,87		



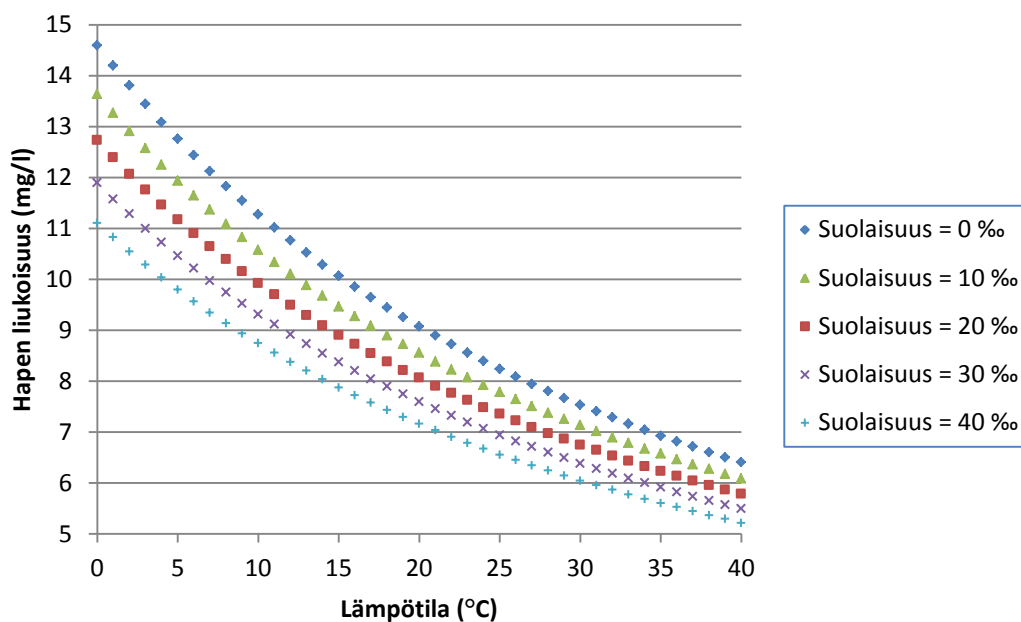
**Kuva 3.** Hapen liukoisuus veden syvyyden funktiona (veden lämpötila on +20 °C ja ilmanpaine 760 mmHg) (Colt, 1984, 47).

### 3.1.2 Epäpuhtaudet

Lämpötilan ja paineen lisäksi myös veden epäpuhtaudet vaikuttavat hapen liukoisuuteen. Suolaisuuden vaikutus hapen liukoisuuteen on esitetty taulukossa 3 ja havainnollistettu kuvassa 4. Suolaisuus on määritetty veden kiintoaineen määräksi sen jälkeen, kun kaikki karbonaatit on muutettu oksideiksi, kaikki bromidi ja jodidi on korvattu kloridilla ja kaikki orgaaninen aine on hapettunut (APHA, AWWA & WPCF, 1976). Hapen liukoisuus pienenee suolaisuuden kasvaessa.

**Taulukko 3.** Hapen liukoisuus veteen eri suolaisuuksilla eri lämpötiloissa (ilmanpaine on 760 mmHg) (Metcalf & Eddy, 2003, 1745-1746).

Lämpötila (°C)	Hapen liukoisuus (mg/l)									
	Suolaisuus (‰)									
	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
0	14,60	14,11	13,64	13,18	12,74	12,31	11,90	11,50	11,11	10,74
2	13,81	13,36	12,91	12,49	12,07	11,67	11,29	10,91	10,55	10,20
4	13,09	12,67	12,25	11,85	11,47	11,09	10,73	10,38	10,04	9,71
6	12,44	12,04	11,65	11,27	10,91	10,56	10,22	9,89	9,57	9,27
8	11,83	11,46	11,09	10,74	10,40	10,07	9,75	9,44	9,14	8,85
10	11,28	10,92	10,58	10,25	9,93	9,62	9,32	9,03	8,75	8,47
12	10,77	10,43	10,11	9,80	9,50	9,21	8,92	8,65	8,38	8,12
14	10,29	9,98	9,68	9,38	9,10	8,82	8,55	8,30	8,04	7,80
16	9,86	9,56	9,28	9,00	8,73	8,47	8,21	7,97	7,73	7,50
18	9,45	9,17	8,90	8,64	8,39	8,14	7,90	7,66	7,44	7,22
20	9,08	8,81	8,56	8,31	8,07	7,83	7,60	7,38	7,17	6,96
22	8,73	8,48	8,23	8,00	7,77	7,54	7,33	7,12	6,91	6,72
24	8,40	8,16	7,93	7,71	7,49	7,28	7,07	6,87	6,68	6,49
26	8,09	7,87	7,65	7,44	7,23	7,03	6,83	6,64	6,46	6,28
28	7,81	7,59	7,38	7,18	6,98	6,79	6,61	6,42	6,25	6,08
30	7,54	7,33	7,14	6,94	6,75	6,57	6,39	6,22	6,05	5,89
32	7,29	7,09	6,90	6,72	6,54	6,36	6,19	6,03	5,87	5,71
34	7,05	6,86	6,68	6,51	6,33	6,17	6,01	5,85	5,69	5,54
36	6,82	6,65	6,47	6,31	6,14	5,98	5,83	5,68	5,53	5,39
38	6,61	6,44	6,28	6,12	5,96	5,81	5,66	5,51	5,37	5,24
40	6,41	6,25	6,09	5,94	5,79	5,64	5,50	5,36	5,22	5,09



**Kuva 4.** Hapen liukoisuus veden eri suolaisuuksilla (ilmanpaine on 760 mmHg) (Metcalf & Eddy, 2003, 1745-1746).

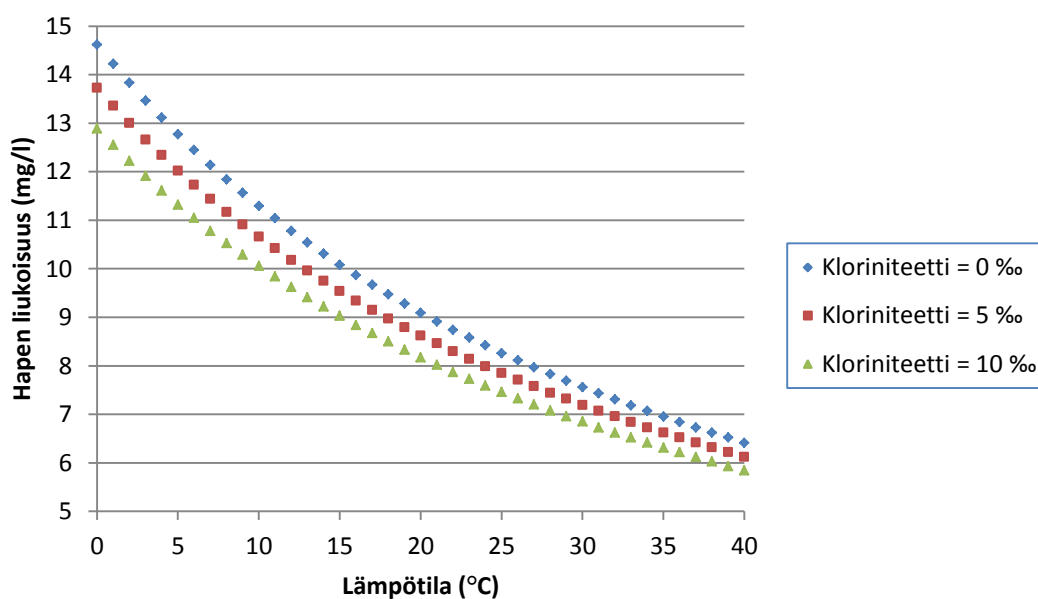
Kloriniteetti ilmoittaa veden sisältämän kloridin, bromidin sekä jodidin määrän. Suolaisuuden ja kloriniteetin välillä pätee yhtälö (12) (APHA, AWWA & WPCF, 1976).

$$\text{Suolaisuus (‰)} = 0,03 + 1,805 \times \text{kloriniteetti (‰)} \quad (12)$$

Veden epäpuhtauksien vaikutus hapen liukoisuuteen on esitetty taulukossa 4 kloriniteetin avulla. Taulukon arvot perustuvat Bensonin ja Krausen (1984) hapen liukoisuustutkimuksiin. Kuten taulukosta voidaan nähdä, hapen liukoisuus veteen pienenee veden epäpuhtauksien kasvaessa. Tätä on havainnollistettu kuvassa 5.

**Taulukko 4.** Hapen liukoisuus veteen eri kloriniteeteilla eri lämpötiloissa (ilmanpaine on 101,3 kPa) (ASCE, 2007).

Hapen liukoisuus (mg/l)				Hapen liukoisuus (mg/l)			
		Kloriniteetti (‰)				Kloriniteetti (‰)	
Lämpötila (°C)	0	5	10	Lämpötila (°C)	0	5	10
0	14,62	13,73	12,89	22	8,74	8,30	7,87
2	13,83	13,00	12,22	24	8,42	7,99	7,59
4	13,11	12,34	11,61	26	8,11	7,71	7,33
6	12,45	11,73	11,05	28	7,83	7,44	7,08
8	11,84	11,17	10,53	30	7,56	7,19	6,85
10	11,29	10,66	10,06	32	7,31	6,69	6,62
12	10,78	10,18	9,62	34	7,07	6,73	6,42
14	10,31	9,75	9,22	36	6,84	6,52	6,22
16	9,87	9,34	8,84	38	6,62	6,32	6,03
18	9,47	8,97	8,50	40	6,41	6,12	5,84
20	9,09	8,62	8,17				



**Kuva 5.** Hapen liukoisuus veden eri kloriniteeteillä (ilmanpaine on 101,3 kPa) (ASCE, 2007).

Leu et al. (1998) havaitsivat myös suspendoituneilla kiintoaineilla olevan vaikutusta hapen liukoisuuteen. Sekä piimaan että kaoliniitin havaittiin laskevan hapen kyllästyspitoisuutta. Kaoliniitin tapauksessa kyllästyspitoisuus kuitenkin palasi alkuperäiselle tasolle kaoliniittipitoisuuden kasvaessa.



## 3.2 Kokonaishapensiirtokerroin $K_L a$

Kokonaishapensiirtokerroin  $K_L a$  muodostuu hapensiirtokertoimesta  $K_L$  sekä veden ja kaasun välisestä ominaispinta-alasta  $a$ , joka määriteltiin  $a = A/V$ , jossa  $A$  on hapensiirtopinta-ala ja  $V$  veden tilavuus. Sekä  $K_L$  että  $A$  vaikuttavat  $K_L a$ :n arvoon. Erilaiset fysikaaliset ja kemialliset muuttujat vaikuttavat  $K_L$ :ään ja  $A$ :han eri tavoin ja kokonaisvaikutus  $K_L a$ :han voi olla joko negatiivinen tai positiivinen. (Eckenfelder, 2000, 159-168)

### 3.2.1 Lämpötila

Lämpötila vaikuttaa veden ominaisuuksiin monella tavalla. Sen kasvu mm. pienentää sekä veden viskositeettia että pintajännitystä (Haynes, 2012, 6.1-6.6). Tämän takia lämpötila vaikuttaa myös kokonaishapensiirtokertoimeen  $K_L a$ . Lämpötilan kasvu kasvattaa hapensiirtokerrointa ja vaikuttaa lisäksi syntyvien ilmakuplien kokoon (Eckenfelder, 2000, 161-162). Hapensiirtokerroin kasvaa lämpötilan noustessa nestekalvon ohentuessa veden viskositeetin laskun takia ja diffuusiokyvyn kasvaessa (Lewis & Whitman, 1924). Ilmakuplien ja vesipisaroiden koko pienenee lämpötilan kasvusta aiheutuvan veden pintajännityksen alenemisen takia. Tämä kasvattaa hapensiirtopinta-alaa, mikä puolestaan kasvattaa  $K_L a$ :ta.

### 3.2.2 Pinta-aktiiviset aineet

Veden epäpuhtauksista erityisesti pinta-aktiivisilla aineilla on merkittävä vaikutus kokonaishapensiirtokertoimeen. Pinta-aktiiviset aineet ovat yhdisteitä, jotka pieninä pitoisuuksina adsorpoituvat systeemin rajapinnoille ja muuttavat näiden rajapintojen vapaata energiaa, joka vastaa kyseisen rajapinnan muodostamiseksi vaadittavaa minimi energiaa. Yleensä pinta-aktiiviset aineet pienentävät rajapinnan vapaata energiaa. (Rosen, 2004, 1)

Pinta-aktiiviset aineet koostuvat hydrofobisesta ja hydrofiilisestä osasta. Hydrofobinen osa vääristää veden rakennetta hajottamalla vetysidoksia. Tämä saa aikaan sen, että osa pinta-aktiivisista aineista joutuu veden rajapinnoille, missä pinta-aktiivisten aineiden hydrofobiset osat ovat mahdollisimman vähän kosketuksissa vesimolekyylien kanssa.

Rajapinta täyttyy pinta-aktiivisten aineiden kerroksesta, johon pinta-aktiiviset aineet ovat asettuneet niin, että niiden hydrofobinen osa on ilmaan päin. Pinta-aktiivisten aineiden hydrofobinen osa ja ilman molekyylit ovat molemmat ei-poolisia verrattuna vesimolekyyleihin, jotka ovat poolisia. Tämä erilaisuuden muutos rajapinnalla saa aikaan veden pintajännityksen alenemisen. Pinta-aktiivisen aineen hydrofiilinen osa, joka on suuntautuneena veteen päin, estää pinta-aktiivisten aineiden poistumisen vedestä kokonaan. (Rosen, 2004, 2-3)

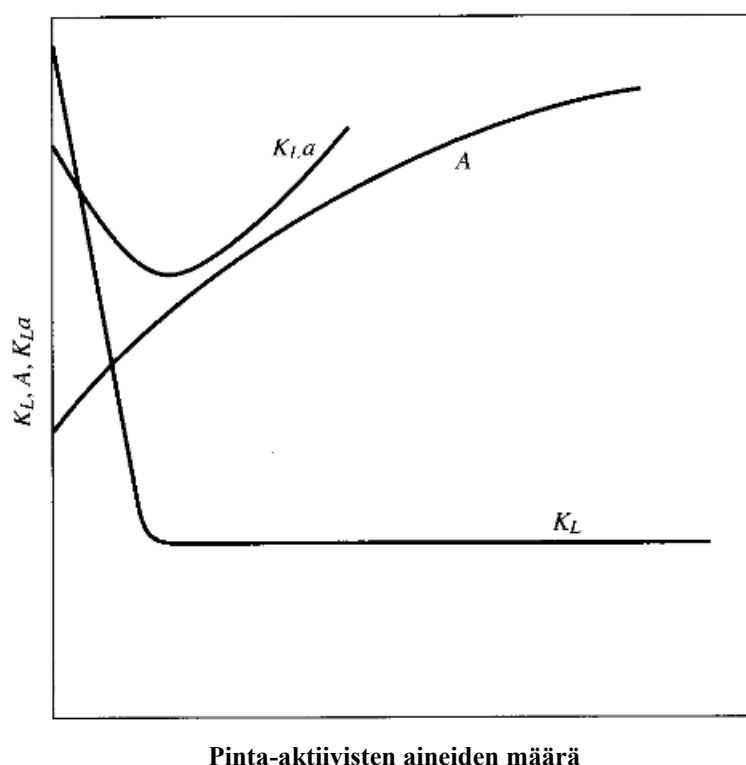
Pinta-aktiivisten aineiden hydrofobinen osa koostuu yleensä pitkästä hiilivetyketjusta ja hydrofiilinen osa ionisesta tai hyvin poolisesta ryhmästä. Pinta-aktiiviset aineet voidaan jakaa neljään ryhmään niiden hydrofiilisen osan mukaan: anionisiin, kationisiin, kahtaisionisiin ja ionittomiin. Anionisilla pinta-aktiivisilla aineilla hydrofiilinen osa on negatiivisesti varattu, kun taas kationisilla pinta-aktiivisilla aineilla varaus on positiivinen. Kahtaisionisilla pinta-aktiivisilla aineilla voi olla sekä negatiivinen että positiivinen varaus hydrofiilisessä osassa. Ionittomilla pinta-aktiivisilla aineilla ei ole lainkaan varausta. (Rosen, 2004, 3)

Pinta-aktiivisten aineiden vaikutuksia hapensiirtoon on tutkittu paljon (Mancy & Okun, 1960; Aiba & Toda, 1963; Stenstrom & Hwang, 1980; Hébrard, et al., 2000; Chern, et al., 2001; Rosso, 2005; Rosso & Stenstrom, 2006; Rosso, et al., 2006; Jamnongwong, et al., 2010). Anionisten ja kationisten pinta-aktiivisten aineiden on havaittu pienentävän ilmakuplien kokoa ja kasvattavan hapensiirtopinta-alaa (Gillot, et al., 2000; Painmanakul, et al., 2005; Painmanakul & Hébrard, 2008). Pienellä pitoisuudella (1 mg/l) Gillot et al. (2000) eivät havainneet ionittomalla pinta-aktiivisella aineella vaikutusta kuplakokoon. Suuremmilla pitoisuuksilla ionittomien pinta-aktiivisten aineiden on kuitenkin havaittu kasvattavan hapensiirtopinta-alaa (Painmanakul & Hébrard, 2008).  $K_{La}$ :n on havaittu laskevan anionisilla, kationisilla ja ionittomilla pinta-aktiivisilla aineilla (Painmanakul, et al., 2005; Painmanakul & Hébrard, 2008). Pienellä pitoisuudella (1 mg/l) anionisilla pinta-aktiivisilla aineilla ei kuitenkaan ole vaikutusta  $K_{La}$ :han, vaan pienentynyt kuplakoko kompensoi alentuneen  $K_L$ :n vaikutusta (Gillot, et al., 2000).

Stenstrom ja Hwang (1980) tiivistävät pinta-aktiivisten aineiden vaikutukset hapensiirtoon seuraavasti:

1. pinta-aktiiviset aineet kiinnittyvät ilmakuplien pintaan vaikeuttaen hapensiirtoa,
2. hapensiirtopinta-ala kasvaa pienentyneen kupla- ja pisarakoon sekä kuplien hitaamman nousunopeuden takia ja
3. hapensiirtopinta-alan uusiutumisnopeus hidastuu kuplien nousunopeuden pienentymisen takia.

Edellä mainittujen tekijöiden yhteisvaikutus  $K_{La}$ :han voi olla negatiivinen tai positiivinen. Kuvassa 6 on havainnollistettu pinta-aktiivisten aineiden vaikutusta  $K_{La}$ :han, hapensiirtokertoimeen  $K_L$  ja hapensiirtopinta-alaan  $A$ . Pinta-aktiivisten aineiden määrän kasvaessa kuplien koko pienenee, sillä pinta-aktiiviset aineet pienentävät veden pintajännitystä. Tämä kasvattaa hapensiirtopinta-alaa.  $K_L$  pienenee ensin pinta-aktiivisten aineiden määrän lisääntyessä vedessä ja niiden kerääntyessä ilmakuplien pinnalle, mutta tietyn pisteen jälkeen pinta-aktiivisten aineiden määrän kasvulla ei ole enää vaikutusta.  $K_{La}$  pienenee ensin  $K_L$ :n pienentyessä, mutta kääntyy sitten nousuun hapensiirtopinta-alan jatkaessa kasvua  $K_L$ :n saavutettua minimin. (Eckenfelder, 2000, 162-163)



**Kuva 6.** Pinta-aktiivisten aineiden vaikutus  $K_L$ :ään,  $A$ :han ja  $K_{La}$ :han (Eckenfelder, 2000, 163).

### 3.2.3 Muut epäpuhtaudet

Zieminski et al. (1967) lisäsivät veteen useita erilaisia mono- ja dikarboksyylihappoja sekä alkoholeja. Kaikki yhdisteet pienensivät syntyvien ilmakuplien kokoa ja kasvattivat hapensiirtopinta-alaa. Tämän johtui ilmakuplien yhteenkasvamisen vähenemisestä. Suurin pinta-alan kasvu saavutettiin monodikarboksyylihapoilla ja pienin dikarboksyylihapoilla. Alkoholeilla saavutettiin lähes monodikarboksyylihappoihin verrattavissa oleva pinta-alan kasvu.  $K_L$  nousi kaikilla yhdisteillä aluksi, mutta laski sitten huomattavasti pienemmäksi kuin puhtaalla vedellä. Sekä pinta-alan että  $K_L$ :n kasvun havaittiin riippuvan yhdisteen hiiliketjun pituudesta niin, että pidempi ketjuisilla yhdisteillä kasvu oli suurempaa.  $K_L$  kasvoi suurimmalla osalla yhdisteistä ja esim. 10 ppm heptaanihappopitoisuudella saavutettiin 180 % kasvu. Kasvun havaittiin olevan pienillä pitoisuuksilla sitä merkittävämpi mitä pidempi yhdisteen hiiliketju oli.

Benedek (1971) havaitsi TDS:n (total dissolved solids) eli veteen liuenneiden mineraalien määrän kasvulla positiivisen vaikutuksen  $K_L$ :han. Hän selitti sen veden pintajännityksen kasvulla, joka estää ilmakuplien yhteen kasvamisen ja kasvattaa siten hapensiirtopinta-alaa.

Leu et al. (1998) lisäsivät suspendoituneita kiintoaineita (piimaa ja kaoliniitti) veteen ja havaitsivat niiden pienentävän  $K_L$ :ta. He arvioivat tämän johtuvan kiintoainepitoisuuden vaikutuksesta hapen kyllästyspitoisuuteen, joka aleni kiintoainepitoisuuden kasvaessa. Kaoliniitin tapauksessa kyllästyspitoisuus lähti kuitenkin uudestaan kasvuun tietyn kaoliniittipitoisuuden jälkeen. Myös Chern et al. (2001) havaitsivat piimaan laskevan  $K_L$ :ta, mutta heidän havaintojensa mukaan vaikutus ei ollut merkittävä. Lasku johtui heidän mukaansa kiintoaineen vaikutuksesta ilmakuplien hydrodynaamiseen käyttäytymiseen sekä pienemmästä ilman ja veden välisestä aineensiirtopinta-alasta. He havaitsivat myös soijaöljyn alentavan  $K_L$ :ta. Soijaöljy pienensi veden pintajännitystä sekä syntyvien ilmakuplien kokoa, mikä suurensi hapensiirtopinta-alaa, mutta ilmakuplien pintaan kiinnittyneet soijaöljymolekyylit kuitenkin aiheuttivat  $K_L$ :n pienenemisen.

Suolan (NaCl) ja glukoosin vaikutuksia hapensiirtoon on myös tutkittu (Painmanakul & Hébrard, 2008; Jamnongwong, et al., 2010). Pienillä pitoisuuksilla kummallakaan ei

havaittu olevan vaikutusta, mutta pitoisuuksien kasvaessa suuremmiksi (NaCl:n pitoisuus 100 g/l ja glukoosin pitoisuus suurempi kuin 20 g/l) hapensiirtokerroin pieneni. Glukoosin tapauksessa lasku oli merkittävämpi. Myös kuplakoko pieneni molempien aineiden tapauksessa pitoisuuksien kasvaessa.

Littlejohns ja Daugulis (2007) tutkivat neljän erilaisen kiinteän aineen vaikutusta hapensiirtoon ja havaitsivat, että lasihelmet ja nailon 6,6 kasvattivat  $K_L$ :ta. Nailon 6,6 kasvatti  $K_L$ :ta parhaimmillaan 268 % verrattuna kiintoaineettomaan veteen. Silikonikumi ja styreenibutadieenisekapolymeeri alensivat  $K_L$ :ta laskun ollessa suurimmillaan 63 %.

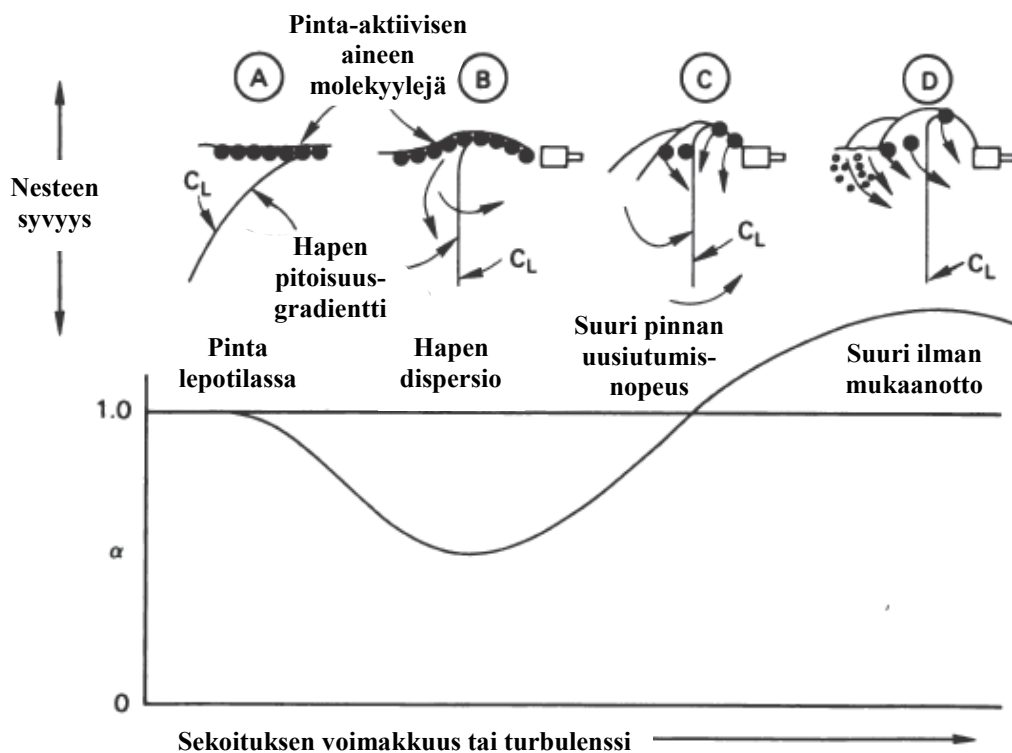
### ***3.2.4 Sekoitus ja turbulenssi***

Turbulenttisen sekoituksen lisääminen kasvattaa  $K_L$ :ta (Eckenfelder, 2000, 161). Mekaanisilla ilmastimilla tehon lisääminen kasvattaa sekoituksen määrää ja turbulenssia (Bass & Shell, 1978; Otoski, et al., 1979). Diffuusioilmastimien tapauksessa ilmavirran kasvattaminen lisää veden turbulenssia (Leu, et al., 1998; Eckenfelder, 2000, 168). Painmanakulin et al. (2005) mukaan ilmavirran kasvattaminen ei vaikuta  $K_L$ :ään, mutta kasvattaa hapensiirtopinta-alaa. Kuitenkin pienillä ilmavirroilla myös  $K_L$  kasvaa ilmavirran kasvaessa (Painmanakul & Hébrard, 2008).

Martín et al. (2008) tutkivat makro- ja mikrosekoituksen merkitystä  $K_L$ :han. Makrosekoituksella tarkoitetaan koko vesitilavuuden sekoittumista, kun taas mikrosekoitus ottaa huomioon veden pienet pyörteet, jotka aiheuttavat pitoisuusgradientit ilmakuplien läheisyydessä. Molempien sekoitusmekanismien havaittiin olevan merkittäviä tekijöitä  $K_L$ :n muodostumisessa, mutta mikäli vedessä on happea kuluttavaa ainesta mikrosekoituksen merkitys kasvaa, sillä hapen kulumisen kasvattaa pitoisuusgradientteja ilmakuplien läheisyydessä.

Sekoituksella on myös merkittävä vaikutus siihen, kuinka pinta-aktiiviset aineet pystyvät vaikuttamaan  $K_L$ :han. Kuvassa 7 on esitetty sekoituksen ja  $\alpha$ -kertoimen välinen yhteys tietyllä pinta-aktiivisten aineiden määrällä.  $\alpha$ -kerroin on epäpuhtauksia sisältävän veden ja puhtaan veden  $K_L$ :n suhde. Kun sekoitusta ei ole, hapensiirron nopeuteen vaikuttaa diffuusio nestebulkissa, eikä rajapinnalla ole tähän juuri vaikutusta. Sekoituksen lisääntyessä nestebulkissa saavutetaan täydellinen sekoittuminen ja

rajapinnalle kiinnittyneet pinta-aktiiviset aineet hidastavat diffuusiota. Sekoituksen edelleen kasvaessa rajapinta uusiutuu niin nopeasti, etteivät pinta-aktiiviset aineet ehdi muodostamaan rajapinnalle hapensiirtoa vastustavaa kerrosta, joten se nopeutuu. Mikäli sekoitusta edelleen lisätään, veteen alkaa siirtyä pieniä ilmakuplia, jotka kasvattavat hapensiirtopinta-alaa ja  $\alpha$ -kerroin kasvaa suuremmaksi kuin 1. (Gilbert, 1979)



**Kuva 7.** Sekoituksen vaikutus  $\alpha$ -kertoimeen tietyn määrän pinta-aktiivisia aineita sisältävässä vedessä (Gilbert, 1979).

### 3.2.5 Laitteisto

Epäpuhtauksia sisältävän veden ilmastukseen käytettävällä laitteistolla on vaikutusta  $K_{La}$ :han ja tyypillisesti diffuusioilmastimilla  $K_{La}$  laskee enemmän kuin mekaanisilla ilmastimilla, joilla se saattaa jopa nousta (Stenstrom & Gilbert, 1981). Otski et al. (1979) tutkivat staattista ilmastinta, diffuusioilmastinta ja pintailmastinta. He havaitsivat  $K_{La}$ :n olevan jokaisella laitteella erilainen ilmastettaessa samanlaista vettä. Pinta-aktiiviset aineet vaikuttivat diffuusioilmastimen  $K_{La}$ :han muita merkittävämmiin. Staattisella ilmastimella  $K_{La}$  kasvoi, kun sekoitusta lisättiin. Myös Backman et al. (1987; 1988) havaitsivat  $K_{La}$ :n vaihtelevan samanlaisen veden ilmastuksessa riippuen käytettävästä laitteesta. He käyttivät diffuusio- ja suihkuilmastinta erilaisten jätevesien ilmastukseen ja havaitsivat epäpuhtauksien laskevan diffuusioilmastimen  $K_{La}$ :ta.

Suihkuilmastimen  $K_La$  nousi suurimmassa osassa käytetyistä jätevesistä. Rosso ja Stenstrom (2006) selittävät pinta-aktiivisten aineiden suurempaa vaikutusta diffuusioilmastimiin turbulenssilla. Heidän mukaansa hienokuplailmastimien tapauksessa turbulenssi on pientä ja ilmakuplien pinnan uusiutumisnopeus matala, mikä aiheuttaa pienemmän  $K_La$ :n. Turbulenssin lisääntyessä pinnan uusiutumisnopeus kasvaa ja pinta-aktiivisia aineita poistuu kuplien pinnalta, mikä kasvattaa  $K_La$ :ta.

## 4 Hapensiirron mittaaminen

### 4.1 Korjauskertoimet

Useiden hapensiirtonopeuteen vaikuttavien tekijöiden takia ilmastuslaitteistot pyritään arvioimaan standardiolosuhteissa, jotka määritellään seuraavasti: veden lämpötila on +20 °C (Yhdysvalloissa) tai +10 °C (Euroopassa), ilmanpaine on 760 mmHg ja vetenä käytetään tavallista hanavettä, mistä on poistettu kaikki liuennut happi (Stenstrom & Gilbert, 1981). Harvoin kuitenkaan mittausolosuhteet ovat täysin standardiolosuhteiden mukaiset. Tämän takia on määritelty useita korjauskertoimia, joilla pyritään ottamaan huomioon eri tekijöiden vaikutus hapensiirtoon ja korjaamaan mittaustulokset standardiolosuhteisiin. Aina ei myöskään ilmasteta puhdasta vettä, vaan erilaisia jätevesiä. Näiden sisältämien epäpuhtauksien vaikutuksia pyritään myös ottamaan huomioon korjauskertoimilla.

#### 4.1.1 Lämpötila- ja painekorjauskertoimet hapen liukoisuudelle

Hapensiirtotehokkuutta laskettaessa lämpötilan sekä ilmanpaineen ja veden syvyyden vaikutus hapen liukoisuuteen otetaan huomioon korjauskertoimilla  $\tau$  ja  $\Omega$ , jotka määritellään yhtälöiden (13) ja (14) mukaisesti. Mikäli ilmastettavan veden syvyys on alle 6 metriä, voidaan  $\Omega$  laskea yhtälöstä (15). (ASCE, 2007; WPCF & ASCE, 1988, 18))

$$\tau = \frac{C_{ST}}{C_{S20}} \quad (13)$$

$$\Omega = \frac{p_b + \gamma_{wt}d_e - p_{vt}}{p_s + \gamma_{wt}d_e - p_{vt}} \quad (14)$$

$$\Omega = \frac{p_b}{p_s} \quad (15)$$

missä  $\tau$  on lämpötilakorjauskerroin,

$C_{ST}$  on hapen liukoisuuden taulukkoarvo lämpötilassa T,

$C_{S20}$  on hapen liukoisuuden taulukkoarvo lämpötilassa +20 °C,



$\Omega$  on painekorjauskerroin,  
 $p_b$  on ilmanpaine mittauksen aikana,  
 $p_s$  on standardi-ilmanpaine (760 mmHg),  
 $\gamma_{wt}$  on veden tiheys mittaustilassa,  
 $d_e$  on tehokas kyllästysvyvyys ja  
 $p_{vt}$  on veden höyrynpaine mittaustilassa.

#### **4.1.2 Lämpötilakerroin kokonaishapensiirtokertoimelle**

Lämpötilan vaikutus kokonaishapensiirtokertoimeen otetaan huomioon korjauskertoimella  $\theta$ , josta on esitetty kaksi eri versiota yhtälöissä (16) ja (17): (Stenstrom & Gilbert, 1981)

$$K_L a_T = K_L a_{20} \theta_G^{(T-20)} \quad (16)$$

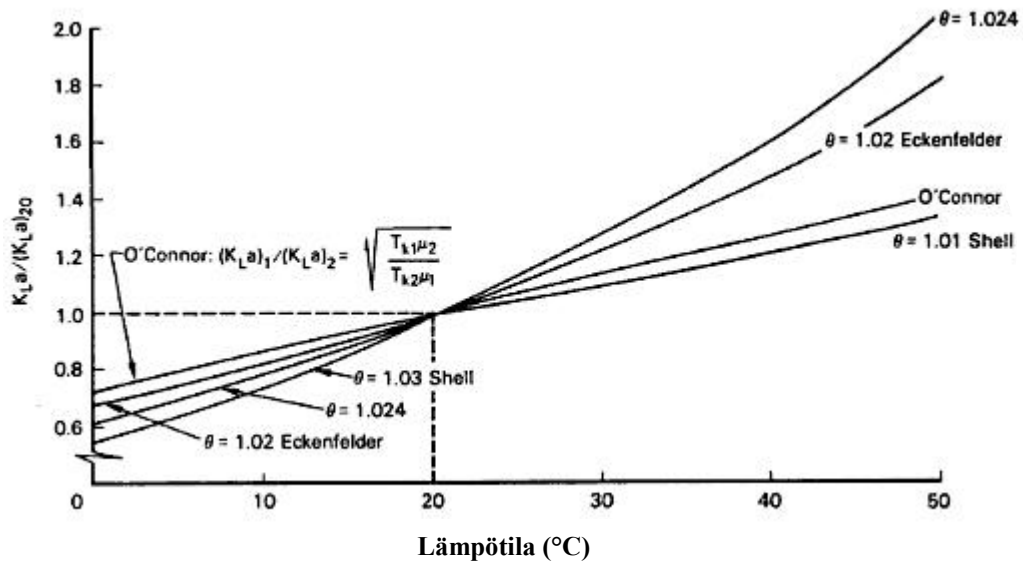
$$K_L a_T = K_L a_{20} + \theta_A (T - 20) \quad (17)$$

missä  $K_L a_T$  on kokonaishapensiirtokerroin lämpötilassa T,  
 $K_L a_{20}$  on kokonaishapensiirtokerroin lämpötilassa +20 °C,  
 $\theta_G$  on geometrinen lämpötilakerroin,  
 $\theta_A$  on aritmeettinen lämpötilakerroin ja  
T on lämpötila.

Yhtälön (16) mukaista geometrinen lämpötilakerrointa käytetään yleisemmin. Se on kokeellisesti määritelty kerroin, johon on pyritty sisällyttämään kaikki mahdolliset lämpötilan vaikutukset kuten viskositeetin, pintajännityksen ja hapen diffuusiokyvyn muutokset. Tästä johtuen  $\theta$ :lle on saatu paljon erilaisia arvoja. On myös ristiriitaista tietoa siitä, kumpi kertoimista, geometrinen vai aritmeettinen, antaa paremman korjauksen. Lisäksi turbulenssilla on huomattu olevan vaikutusta lämpötilakertoimeen. Näyttääkin siltä, että  $\theta$  saattaa olla jokaiselle ilmastuslaitteistolle erilainen. (Stenstrom & Gilbert, 1981)

Kuvassa 8 on esitetty geometrisen lämpötilakertoimen vaikutus hapensiirtokertoimeen. Kuvasta voidaan nähdä, kuinka lämpötilan poikkeaminen standardista (+20 °C) aiheuttaa välittömästi eroja eri korjauskertoimien välillä. Virheiden välttämiseksi

ilmastuslaitteistoa tulisikin pyrkiä testaamaan mahdollisimman lähellä +20 °C:ta, eikä yli 10 °C:een korjauksien tekemistä suositella. (Stenstrom & Gilbert, 1981)



**Kuva 8.** Geometrisen lämpötilakertoimen vaikutus hapensiirtokertoimeen (Gilbert, 1979).

Geometrisen lämpötilakertoimen arvot voivat vaihdella välillä 1,008 – 1,047 riippuen ilmastimen tyypistä (Stenstrom & Gilbert, 1981). ASCE:n (2007) mukaan lämpötilakertoimenä suositellaan käytettävän arvoa 1,024 ellei kokeellisesti ole osoitettu olennaista eroa.

#### 4.1.3 $\alpha$ ja $\beta$

$\alpha$ -kerroin ottaa huomioon ilmastimen tyypin, ilmastusaltan geometrian, sekoitusasteen ja jäteveden laadun vaikutuksen kokonaishapensiirtokertoimeen.  $\beta$ -kerroin huomioi jäteveden suolapitoisuuden, epäpuhtauksien laadun sekä määrän ja pinta-aktiivisten aineiden vaikutuksen hapen liukenemiseen. Korjauskertoimet  $\alpha$  ja  $\beta$  määritellään yhtälöiden (18) ja (19) mukaisesti: (RIL, 2003, 205)

$$\alpha = \frac{K_L a_{(jätevesi)}}{K_L a_{(hanavesi)}} \quad (18)$$

$$\beta = \frac{C_S(jätevesi)}{C_S(hanavesi)} \quad (19)$$

missä  $K_L a_{(jätevesi)}$  on kokonaishapensiirtokerroin jätevedessä,  
 $K_L a_{(hanavesi)}$  on kokonaishapensiirtokerroin hanavedessä,  
 $C_{S(jätevesi)}$  on hapen kyllästyspitoisuus jätevedessä ja  
 $C_{S(hanavesi)}$  on hapen kyllästyspitoisuus hanavedessä.

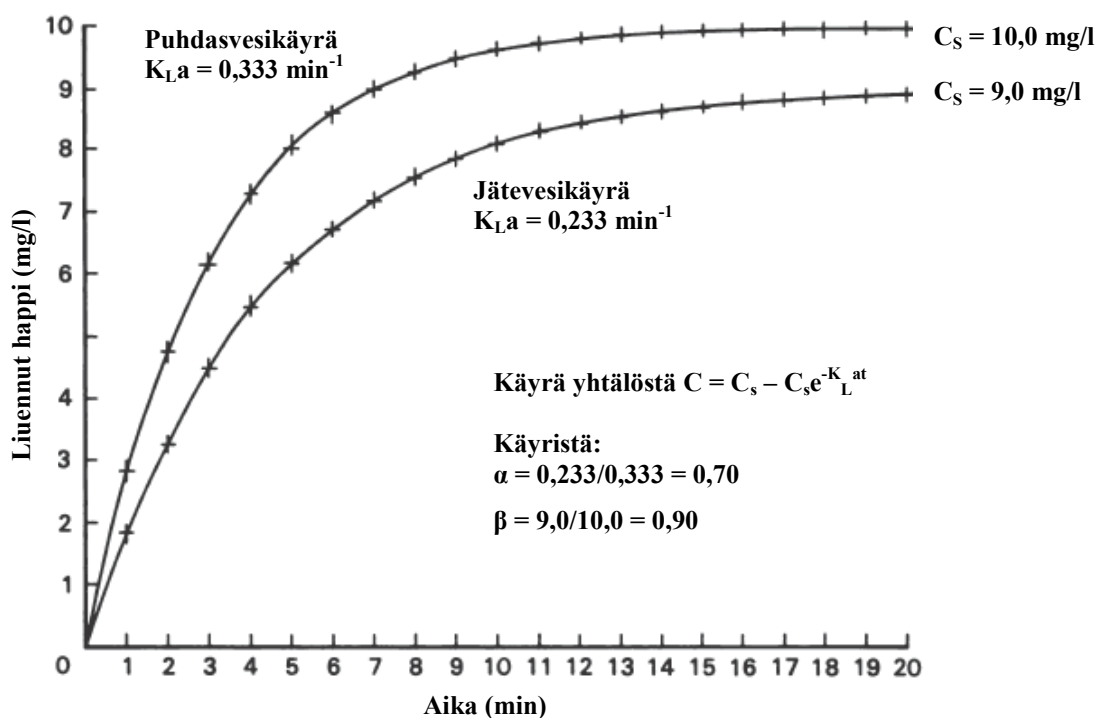
$\alpha$ :n tarkka määrittäminen on vaikeaa ja sen on huomattu vaihtelevan todella paljon riippuen mm. jäteveden laadusta, sekoituksen määrästä ja ilmastuslaitteistosta. Saman jäteveden ilmastuksessa on saatu eri ilmastuslaitteistoilla hyvin erilaisia  $\alpha$ :n arvoja (Otoski, et al., 1979; Backman, et al., 1987; Backman, et al., 1988). Tulisikin pyrkiä käyttämään mahdollisimman samankaltaista ilmastuslaitteistoa tehtäessä testi-ilmastuksia kuin mitä tullaan käyttämään todellisissa prosessiolosuhteissa. Näin voidaan minimoida  $\alpha$ :aan vaikuttavien muuttujien merkitystä. (Gilbert, 1979; Stenstrom & Gilbert, 1981)

Monien  $\alpha$ :aan vaikuttavien tekijöiden, kuten ilmastuslaitteiston ja jäteveden laadun takia sen arvot voivat vaihdella paljon välillä 0,3 – 1,2. Diffuusioilmastimille  $\alpha$ :n arvot ovat tyypillisesti pienempiä kuin mekaanisille ilmastimille. Sen on myös havaittu vaihtelevan kellonajan ja viikompäivän mukaan jäteveden vaihtelevan koostumuksen takia. Siksi tulisikin pyrkiä suunnittelemaan ilmastuslaitteistot toimimaan vaihtelevilla  $\alpha$ :n arvoille yhden arvon sijaan. (Stenstrom & Gilbert, 1981)

$\beta$ :n arvot eivät vaihtele niin paljon kuin  $\alpha$ :n, mutta myös sen määrittäminen on haasteellista, sillä liuenneen hapen mittaaminen jätevesistä saattaa olla ongelmallista. Jätevesiin lienneet suolat häiritsevät elektronisten happimittareiden toimintaa eikä niillä välttämättä saada tarkkoja tuloksia. Kemiallinen Winklerin menetelmä ei myöskään aina sovellu liuenneen hapen määrän määrittämiseen jäteveden epäpuhtauksien takia. Mikäli Winklerin menetelmää ei voida luotettavasti käyttää, voidaan  $\beta$  laskea veteen liuenneiden mineraalien (TDS) määrän avulla käyttäen hyväksi liukoisuudelle määritettyjä taulukkoarvoja. (Stenstrom & Gilbert, 1981)

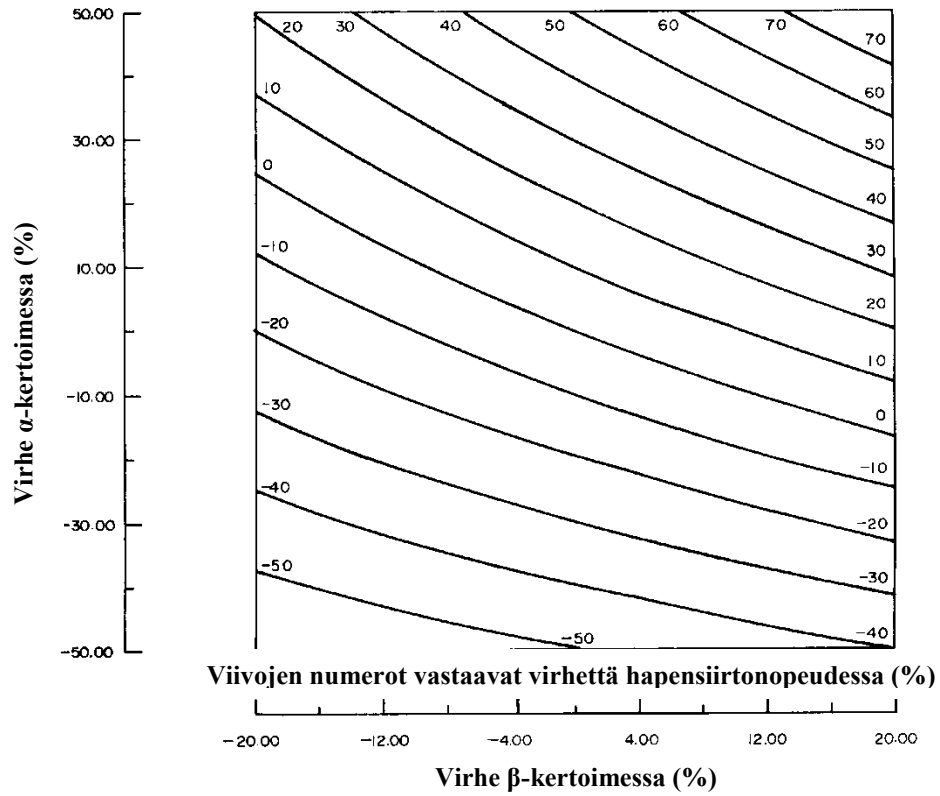
$\beta$ :n arvo voi vaihdella välillä 0,7 – 1,0 (ASCE, 2007; Stenstrom & Gilbert, 1981). RIL (2003, 205) mainitsee yleisesti käytettäväksi arvoksi 0,98, mutta myös arvo 0,95 mainitaan kirjallisuudessa (Metcalf & Eddy, 2003, 429; Stenstrom & Gilbert, 1981).

$\alpha$ -kerroin siis ottaa huomioon jäteveden vaikutuksen  $K_{La}$ :han ja  $\beta$ -kerroin hapen liukoisuuteen. Kuvassa 9 on esitetty tyypilliset veden hapetuskäyrät, jotka havainnollistavat  $\alpha$ :n ja  $\beta$ :n vaikutusta hapensiirtoon sekä puhtaalle vedelle että jätevedelle. Molemmilla käyrillä on oma kokonaishapensiirtokertoimensa sekä hapen kyllästyspitoisuutensa.  $\beta$  voidaan määrittää mittaamalla suoraan hapen kyllästyspitoisuus.  $\alpha$ :n määrittämiseen voidaan käyttää useampaa eri analyysimenetelmää. (Gilbert, 1979)



**Kuva 9.** Havainnekuva  $\alpha$ :n ja  $\beta$ :n vaikutuksista (Gilbert, 1979).

Kuvassa 10 on esitetty virheellisten  $\alpha$ - ja  $\beta$ -kertoimien vaikutus hapensiirtonopeuteen.  $\alpha$ :n,  $\beta$ :n ja jo aiemmin esitellyn lämpötilakertoimen  $\theta$ :n määrittäminen oikein on erittäin tärkeää. Kertoimia käytetään ilmastuslaitteiston suunnittelussa, joten väärin määritetyt kertoimet voivat aiheuttaa yli- tai alimitoitettujen laitteistojen rakentamisen. (Stenstrom & Gilbert, 1981)



**Kuva 10.** Hapensiirtonopeuden virhe  $\alpha$ :n ja  $\beta$ :n virheiden funktiona, kun  $\alpha = 0,8$  ja  $\beta = 0,9$  (Stenstrom & Gilbert, 1981).

## 4.2 Ilmastuslaitteiston tunnusluvut

Ilmastuslaitteiston tehokkuutta voidaan kuvata erilaisilla tunnusluvuilla, joita ovat mm. hapensiirtonopeus OTR (oxygen transfer rate), hapensiirtotehokkuus OTE (oxygen transfer efficiency) ja ilmastustehokkuus AE (aeration efficiency). Tunnusluvut voidaan laskea kokonaishapensiirtokertoimen  $K_L a$  ja kyllästyspitoisuuden  $C_S$  avulla.

Yhtälöistä (20), (21) ja (22) voidaan laskea hapensiirtonopeus, hapensiirtotehokkuus sekä ilmastustehokkuus standardiolosuhteissa (puhdas vesi,  $+20\text{ °C}$ ,  $101,3\text{ kPa}$  ja liuenneen hapen määrä vedessä 0) (ASCE, 2007):

$$SOTR_{20} = K_L a_{20} C_{S20} V \quad (20)$$

$$SOTE_{20} = \frac{SOTR_{20}}{W_{O_2}} \quad (21)$$

$$SAE_{20} = \frac{SOTR_{20}}{P} \quad (22)$$

missä  $SOTR_{20}$  on hapensiirtonopeus standardiolosuhteissa [ $\text{kgO}_2/\text{h}$ ],  
 $K_{La20}$  on kokonaishapensiirtokerroin lämpötilassa  $+20\text{ }^\circ\text{C}$  [ $1/\text{h}$ ],  
 $C_{S20}$  on hapen kyllästyspitoisuus vedessä lämpötilassa  $+20\text{ }^\circ\text{C}$  [ $\text{kg/l}$ ],  
 $V$  on vesimäärän tilavuus [ $\text{l}$ ],  
 $SOTE_{20}$  on hapensiirtotehokkuus standardiolosuhteissa  
 $W_{O2}$  on hapen virtausnopeus veteen [ $\text{kgO}_2/\text{h}$ ]  
 $SAE_{20}$  on ilmastustehokkuus standardiolosuhteissa [ $\text{kgO}_2/\text{kWh}$ ] ja  
 $P$  on käytetty teho [ $\text{kW}$ ].

On tärkeää huomata, että yhtälön (20) mukainen  $SOTR_{20}$  kertoo hapensiirtonopeuden veteen, jossa liuenneen hapen määrä on nolla. Yleensä liuenneen hapen määrä ilmastettavissa vesissä on suurempi. (ASCE, 2007)

Standardiolosuhteissa määritellyn hapensiirtotehokkuuden perusteella voidaan arvioida ilmastuslaitteiston todellista hapensiirtotehokkuutta prosessivesille. Käyttöön otetaan aiemmin esitetyt korjauskertoimet  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\theta$ ,  $\Omega$  ja  $\tau$ . Nyt voidaan johtaa kaava (23), joka määrittää seuraavasti (ASCE, 2007):

$$OTR = SOTR_{20} \left( \frac{\tau \Omega \beta C_{S20} - C}{C_{S20}} \right) \alpha \theta_G^{(T-20)} \quad (23)$$

missä  $OTR$  on hapensiirtotehokkuus lämpötilassa  $T$  keskimääräisen liuenneen hapen määrän ollessa  $C$  [ $\text{kgO}_2/\text{h}$ ],  
 $SOTR_{20}$  on hapensiirtotehokkuus standardiolosuhteissa [ $\text{kgO}_2/\text{h}$ ],  
 $C_{S20}$  on hapen kyllästyspitoisuus lämpötilassa  $+20\text{ }^\circ\text{C}$  [ $\text{mg/l}$ ],  
 $C$  on liuenneen hapen keskimääräinen pitoisuus koko vesimäärässä [ $\text{mg/l}$ ],  
 $T$  on prosessiveden lämpötila [ $^\circ\text{C}$ ],  
 $\alpha$  on prosessiveden  $K_{La}$ :n suhde puhtaan veden  $K_{La}$ :han eli  $K_{La20}(\text{jätevesi})/K_{La20}(\text{puhdas})$ ,  
 $\beta$  on prosessiveden hapen kyllästyspitoisuuden suhde puhtaan veden kyllästyspitoisuuteen eli  $C_{S20}(\text{jätevesi})/C_{S20}(\text{puhdas})$ ,  
 $\theta_G$  on geometrinen lämpötilakerroin,

$\tau$  on lämpötilakorjauskerroin ja  
 $\Omega$  on painekorjauskerroin.

OTR:n avulla voidaan laskea hapensiirtotehokkuus sekä ilmastustehokkuus prosessivesille yhtälöiden (21) ja (22) tapaan korvaamalla  $SOTR_{20}$  OTR:llä.

### 4.3 Mittaaminen puhtaassa vedessä

#### 4.3.1 Epälineaarinen regressioanalyysi

Yleisesti käytetty menetelmä hapensiirtotehokkuuden määrittämiseksi puhtaassa vedessä on kuvattu tarkasti American Society of Civil Engineersin (ASCE, 2007) julkaisemassa standardissa. Menetelmässä vedestä poistetaan ensin siihen liuenut happi kemikaaleilla, jonka jälkeen ilmastus käynnistetään ja hapen määrän kasvua vedessä seurataan ilmastuksen aikana. Tämän jälkeen kokonaishapensiirtokerroin voidaan laskea yhtälöstä (8), joka voidaan integroida muotoon:

$$C_L = C_S - (C_S - C_0)e^{-K_L t} \quad (24)$$

missä  $C_0$  on liuenneen hapen pitoisuus hetkellä  $t = 0$ .

Yhtälön (24) vakiot  $C_S$ ,  $C_0$  ja  $K_L$  voidaan määrittää käyttämällä epälineaarista regressiomenetelmää, jossa mitatut liuenneen hapen pitoisuudet ( $C_L$ ) esitetään ajan ( $t$ ) funktiona ja tähän sovitetaan yhtälön (24) esittämä käyrä.

Tämän jälkeen saadut  $C_S$  ja  $K_L$  korjataan standardiolosuhteisiin yhtälöiden (25) ja (26) mukaisesti:

$$K_L a_{20} = K_L a_T \theta_G^{(20-T)} \quad (25)$$

$$C_{S20} = C_S \frac{1}{\tau \Omega} \quad (26)$$

Eri mittauspisteistä saaduista korjatuista hapensiirtokertoimista ja liukoisuuksista lasketaan keskiarvot ja näiden avulla voidaan laskea hapensiirtonopeus

standardiolosuhteissa ( $SOTR_{20}$ ) aiemmin esitetyn yhtälön (20) mukaisesti. Tämän jälkeen  $SOTR_{20}$ :n avulla voidaan laskea hapensiirtotehokkuus ( $SOTE_{20}$ ) sekä ilmastustehokkuus ( $SAE_{20}$ ) yhtälöiden (21) ja (22) mukaisesti.

#### 4.3.2 Logaritminen menetelmä

Mittaus voidaan suorittaa kuten epälineaarista regressioanalyysia käytettäessä, mutta  $K_L a$ :n laskemiseksi yhtälö (24) linearisoidaan ottamalla logaritmi puolittain, minkä jälkeen se voidaan muokata yhtälön (27) mukaiseksi. Sassi ja Keto (2005) käyttivät yhtälöä (27) useiden eri ilmastimien  $K_L a$ :n laskemiseksi.

$$K_L a = - \frac{\ln \frac{(C_s - C)}{(C_s - C_0)}}{t - t_0} \quad (27)$$

missä  $t_0$  on aika hetkellä, jolloin  $C$  on  $C_0$ .

Logaritminen menetelmä käytettäessä  $C_s$ :n määrittämiseen on kiinnitettävä erityistä huomiota ja ilmastusta joudutaan jatkamaan pidempään kuin epälineaarista regressioanalyysia käytettäessä, jotta varmistetaan oikea  $C_s$ :n arvo. Korjaukset standardiolosuhteisiin tehdään yhtälöiden (25) ja (26) mukaisesti ja hapensiirtonopeus lasketaan yhtälöstä (20). (ASCE, 2007)

#### 4.4 Mittaaminen jätevedessä

Mittaus voidaan suorittaa kuten puhtaalle vedelle, mutta mikäli jätevedessä on happea kuluttavia mikrobeja, tulee tämä ottaa huomioon määrittäessä hapensiirtotehokkuutta. Yhtälö (28) on saatu lisäämällä yhtälöön (8) termi  $R$ , mikä kuvaa hapenkulutusta. (Ramalho, 1977, 133)

$$\frac{dC}{dt} = K_L a (C_s - C_L) - R \quad (28)$$

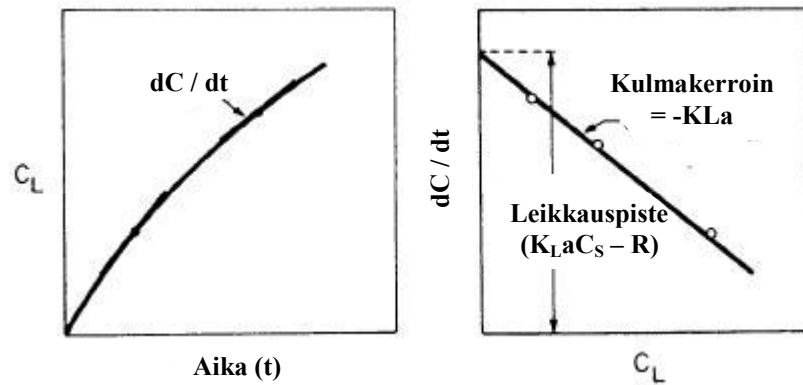
missä  $R$  on hapenkulutus.

Yhtälö (28) voidaan edelleen muokata muotoon (Ramalho, 1977, 133):



$$\frac{dC}{dt} = (K_L a C_S - R) - K_L a C_L \quad (29)$$

Nyt mitatut  $C_L$ -arvot voidaan piirtää ajan funktiona ja kuvaajana saatavasta käyrästä voidaan määrittää kulmakertoimina  $dC/dt$ :n arvoja. Tämän jälkeen  $dC/dt$  voidaan esittää  $C_L$ :n funktiona. Saatavasta suorasta pystytään määrittämään kulmakerroin, joka on yhtälön (29) mukaisesti  $-K_L a$ . Menetelmän periaate on esitetty kuvassa 11.



**Kuva 11.**  $K_L a$ :n määrittäminen graafisesti (Ramalho, 1977, 134).

Yhtälö (28) voidaan myös integroida yhtälön (30) osoittamaan muotoon.  $R$ :n oletetaan olevan vakio. (Pelkonen & Larikka, 1988, 25)

$$C = C_S - \frac{R}{K_L a} + \left( C_0 - C_S + \frac{R}{K_L a} \right) e^{-K_L a t} \quad (30)$$

Yhtälön muoto on täysin samanlainen kuin puhtaan veden tapauksessa ja yhtälöön voidaan soveltaa samaa epälineaarista regressiomenetelmää hieman muokattuna vastaamaan yhtälön (30) muotoa.

#### 4.5 Mittaaminen prosessiolosuhteissa

Ilmastuslaitteen tehokkuutta prosessiolosuhteissa voidaan mitata useilla eri menetelmillä. Käytettäviä menetelmiä ovat mm. vakiohappipitoisuuden perustuva menetelmä, muuttuvan happipitoisuuden menetelmä, poistokaasumenetelmä ja merkkiainemenetelmä (Mueller & Boyle, 1988; Pelkonen & Larikka, 1989).

#### 4.5.1 Vakiohappipitoisuuteen perustuva menetelmä

Vakiohappipitoisuuteen perustuvassa menetelmässä ilmastettavan veden tilavuuden, tulovirtauksen, hapenkulutuksen ja happipitoisuuden tulee olla muuttumattomassa tilassa. Mittaamalla hapenkulutus, hapen kyllästyspitoisuus, happipitoisuus tulovirrassa sekä ilmastettavassa vesitilavuudessa ja tulovirtaama voidaan kokonaishapensiirtokerroin laskea yhtälön (31) mukaisesti: (Mueller & Boyle, 1988)

$$K_L a_f = \frac{R - Q_{vesi}/V(C_0 - C)}{C_S - C} = \frac{Vakio}{C_S - C} \quad (31)$$

missä  $K_L a_f$  on kokonaishapensiirtokerroin prosessiolosuhteissa,  
 $R$  on hapenkulutus,  
 $Q_{vesi}$  on veden tulovirtaama,  
 $V$  on ilmastettavan veden tilavuus,  
 $C_0$  on tulovirran happipitoisuus,  
 $C$  on ilmastettavan veden happipitoisuus ja  
 $C_S$  on hapen kyllästyspitoisuus.

Menetelmän mukainen mittaus on helppo toteuttaa, mutta se saattaa tuottaa merkittävästi pienempiä tai suurempia hapensiirtonopeuksia kuin todellisuudessa saavutetaan. Yliarviointeja on havaittu alhaisen liuenneen hapen pitoisuuksilla, kun taas aliarviointeja aiheuttaa vedessä oleva happea kuluttava aines, joka hajoaa nopeasti eikä sen mittaaminen onnistu. (Mueller & Boyle, 1988)

#### 4.5.2 Muuttuvan happipitoisuuden menetelmä

Muuttuvan happipitoisuuden menetelmässä ilmastettavan veden tilavuuden, tulovirtaaman ja hapenkulutuksen tulee olla vakioita. Menetelmässä veden happipitoisuutta muutetaan joko muuttamalla ilmastuslaitteen tehoa tai lisäämällä vetyperoksidia, joka aiheuttaa veden happipitoisuuden nousun reilusti yli kyllästyspitoisuuden. Tehon lisääminen tuottaa happipitoisuuden suhteen nousevan käyrän ja vetyperoksidin lisääminen laskevan käyrän. Nämä ovat samanlaisia happipitoisuuden käyriä ajan suhteen kuin puhtaan veden testeissä ja

kokonaishapensiirtokerroin voidaan määrittää samasta yhtälöstä, jota käytettiin puhtaan veden tapauksessa. (Mueller & Boyle, 1988)

$$C_L = C - (C - C_0)e^{-(K_L a_f + Q_{vesi}/V)t} \quad (32)$$

Vertaamalla yhtälöä (32) aiemmin puhtaan veden tapauksessa esitettyyn yhtälöön (24), voidaan nähdä, että hapen kyllästyspitoisuus  $C_S$  on korvattu ilmastettavan veden happipitoisuudella  $C$ . Lisäksi eksponenttiin on lisätty tulovirtaama  $Q$  ja veden tilavuus  $V$ . Yhtälön (32) mukaisten parametrien  $C$ ,  $C_0$  ja  $(K_L a_f + Q_{vesi}/V)$  määrittämiseksi voidaan käyttää samanlaista epälineaarista regressiomenetelmää kuin käytettiin puhtaan veden tapauksessakin. (Mueller & Boyle, 1988)

Mitattaessa kokonaishapensiirtokerrointa muuttuvan happipitoisuuden menetelmällä vetyperoksidin lisäämisellä saavutetaan parempi luotettavuus kuin ilmastimen tehon lisäämisellä, sillä vetyperoksidin lisäämisellä saadaan laajempi happipitoisuusalue analysoitavaksi. Muuttuvan happipitoisuuden menetelmällä saadaan samankaltaisia tuloksia kuin tarkimpana määrittämismenetelmänä pidettävällä merkkiainemenetelmällä. (Mueller & Boyle, 1988)

#### 4.5.3 Merkkiainemenetelmä

Merkkiainemenetelmä on tarkin mittaustapa kokonaishapensiirtokertoimen selvittämiseksi (Mueller & Boyle, 1988). Muurinen ja Kuoppamäki (1977) tutkivat ilmastusta merkkiainemenetelmän avulla. Menetelmässä käytetään hyväksi radioaktiivista krypton-85:tä ja tritiumia, joita lisätään ilmastettavaan veteen. Kr-85 poistuu vedestä noudattaen samoja kaasunsiirron lakeja kuin happikin siirtyessään ilmasta veteen. Kr-85:n aineensiirtokerroin saadaan seuraamalla sen pitoisuutta tritiumin pitoisuuden suhteen. Hapen ja Kr-85 aineensiirtokertoimien suhde on vakio yhtälön (33) mukaisesti:

$$\frac{K_{Kr}}{K_L a} = 0,83 \pm 0,04 \quad (33)$$

missä  $K_{Kr}$  on kryptonin aineensiirtokerroin.

Veden laatu ei vaikuta kertoimien suhteeseen eikä myöskään sekoitus tai kaasunsiirron suunta. Lämpötilallakaan ei ole vaikutusta sen ollessa välillä 10 – 30 °C. (Muurinen & Kuoppamäki, 1977, 9)

Radioaktiivisen kryptonin lisäksi merkkiaineena voidaan käyttää kevyitä hiilivetyjä, kuten etyleeniä tai propaania (Hébrard, et al., 2000) sekä jalokaasuja, kuten heliumia. Radioaktiivisen merkkiaineen ongelmana on sen käsittelyn ja mittaamisen vaatima erikoisosaaminen. Hiilivetyjen tapauksessa mm. niiden ominaisuudet rajoittavat käyttöä. Heliumin käytön ongelmana on mm. sen erikoinen käyttäytyminen muiden kaasujen suhteen. (Mueller & Boyle, 1988)

#### **4.5.4 Poistokaasumenetelmä**

Pelkonen ja Larikka (1989) käyttivät poistokaasumenetelmää aktiivilieteprosessin hapensiirron mittaamiseen. Siinä hapensiirtotehokkuuden mittausta tehdään ilmastusaltaan kaasujen massatasapainon avulla. Menetelmässä mitataan systeemiin sisään menevän kaasun ja siitä poistuvan kaasun koostumus. Tämän avulla voidaan suoraan laskea hapensiirtotehokkuus kaavan (34) mukaisesti:

$$OTE = \frac{m_{O_2}(sisään) - m_{O_2}(ulos)}{m_{O_2}(sisään)} \quad (34)$$

missä           OTE on hapensiirtotehokkuus,  
 $m_{O_2}(sisään)$  on hapen massa sisään virtaavassa ilmassa ja  
 $m_{O_2}(ulos)$  on hapen massa poistokaasussa.

Poistokaasumenetelmä ei vaadi vakio-olosuhteita, kuten vakiohappipitoisuuden tai muuttuvan happipitoisuuden menetelmät. Se ei kuitenkaan sovellu pintailmastimien tutkimiseen mittaustapansa vuoksi. Sitä voidaan käyttää pinnanalaisten ilmastuslaitteiden tutkimiseen ja sillä saavutetaan yhteneviä tuloksia merkkiainemenetelmän kanssa. (Mueller & Boyle, 1988)

## 5 Ilmastuksen vaikutus veteen liuenneille aineille

Ilmastuksella voidaan hapen lisäämisen lisäksi vaikuttaa myös veteen liuenneisiin aineisiin. Lisätty happi voi reagoida veden epäpuhtauksien kanssa tai veteen liuenneet kaasut voivat poistua siitä joutuessaan kosketuksiin ilman kanssa. Useimpien epäorgaanisten aineiden poistoa ilmastuksella pidetään kuitenkin tehottomana. Useissa tilanteissa, joissa se olisi käyttökelpoinen, muut käsittelyprosessit ovat kustannustehokkaampia tai sopivampia (AWWA, 2010, 369).

### 5.1 Hajut ja maut

Tietty määrä liuennutta happea vedessä parantaa sen makua. Suurin osa helposti haihtuvista yhdisteistä, jotka aiheuttavat veteen hajuja ja makuja, hapettuvat helposti ja ne voidaan poistaa vedestä ilmastuksella. Yhdisteet, jotka eivät poistu ilmastuksella, voidaan hapettaa jollakin kemiallisella hapettimella tai aktiivihiilikäsittelyllä. (AWWA, 2010, 373)

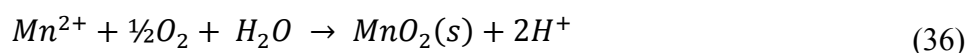
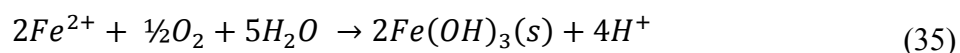
### 5.2 Rauta ja mangaani

Rauta (Fe) ja mangaani (Mn) ovat yleisiä metalleja. Niitä esiintyy erityisesti kaivovesissä ja niiden haitat ihmisille ovat lähinnä esteettisiä. Ne aiheuttavat veden värjäytymistä ja voivat tarhata pyykkejä. Putkistoihin sakkautuneet metallit voivat myös päätyä hanasta ihmisten käyttöveteen. (Sommerfeld, 1999, 3-5) Lisäksi ne voivat aiheuttaa suurina pitoisuuksina haju- ja makuhaittoja (AWWA, 2010, 277). Rautaa esiintyy myös useissa teollisuuden jätevesissä (Eckenfelder, 2000, 150).

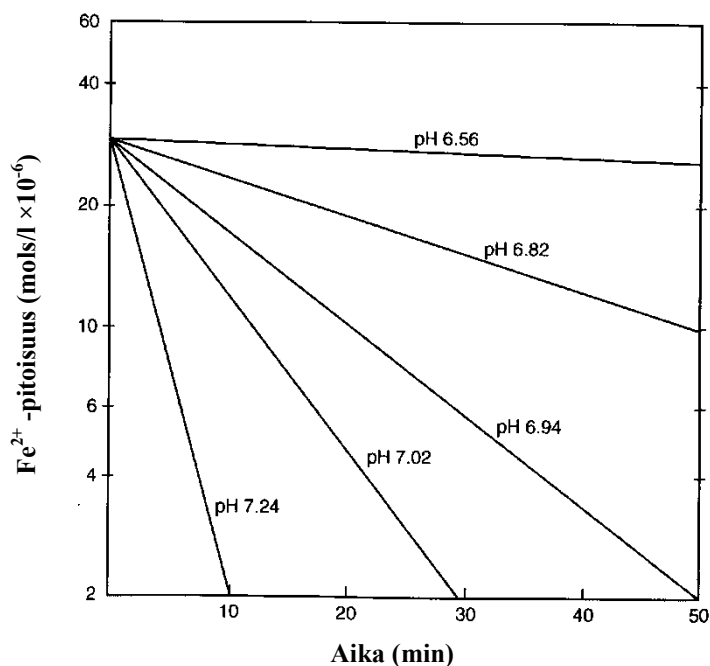
Vedessä rauta on yleensä rauta(II):na tai rauta(III):na riippuen pH:sta ja liuenneen hapen määrästä. Neutraalissa pH:ssa ja hapellisissa olosuhteissa rauta(II) hapettuu nopeasti rauta(III):ksi, mikä edelleen hydrolysoituu muodostaen liukenematonta rautahydroksidia. Korkeammassa pH:ssa rautahydroksidi muodostaa  $\text{Fe}(\text{OH})_4^-$  -kompleksin ja liukenee veteen. Liukenematon orgaaninen aine vedessä hidastaa raudan hapetusta. (Eckenfelder, 2000, 150)

Mangaanin monista olomuodoista vain sen suolat ja permanganaatti ovat merkittävästi liukoisia veteen. Permanganaatti on vahva hapetin ja se pelkistyy normaaliolosuhteissa liukenemattomaksi mangaanidioksidiksi. Mangaani(II)suolat hapettuvat liukenemattomiksi oksideiksi ja hydroksideiksi. Mangaani(II):n reaktio hapen kanssa on kuitenkin hidas eikä perinteinen hapetus ole tehokas sen poistoon pH:n ollessa alle 9. Lisäksi orgaaniset yhdisteet voivat haitata mangaanin hapetusta. (Eckenfelder, 2000, 151)

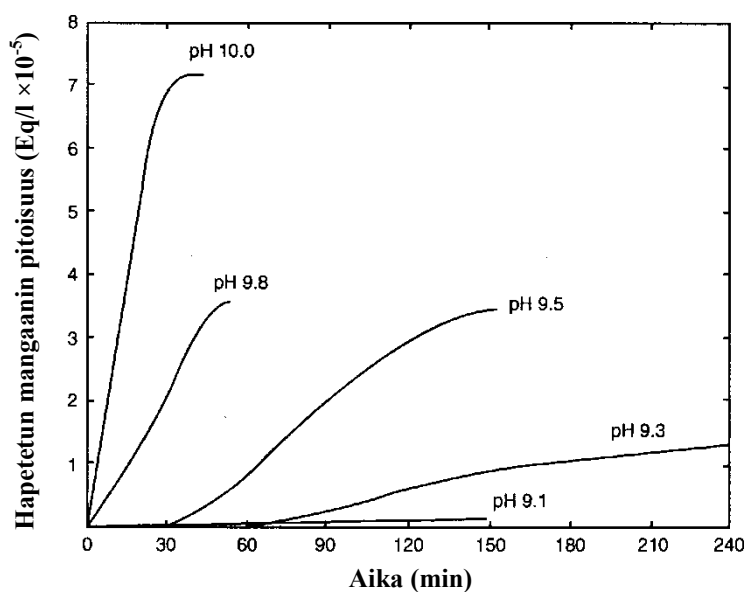
Yhtälöissä (35) ja (36) on esitetty rauta(II):n ja mangaani(II):n reaktioyhtälöt vedessä hapen kanssa. Stoikiometriasta voidaan nähdä, että raudan hapettaminen vaatii vähemmän happea kuin mangaanin. (Sommerfeld, 1999, 26)



Raudan ja mangaanin hapetus on hyvin riippuvainen pH:sta. Tämä on esitetty kuvissa 12 ja 13. Raudan tapauksessa pH saadaan yleensä säädettyä pelkällä ilmastuksella, sillä ilmastus poistaa vedestä hiilidioksidia, joka liuenneena aiheuttaa veden happamuutta. Mangaanin tehokkaaseen poistamiseen pH:n on oltava paljon raudan vaatimaa korkeampi eikä tavallinen ilmastus riitä vaan on lisättävä jotain kemiallista hapetinta kuten klooria. (Binnie, et al., 2006, 201-204)



**Kuva 12.** pH:n vaikutus raudan hapetukseen (Binnie, et al., 2006, 202).



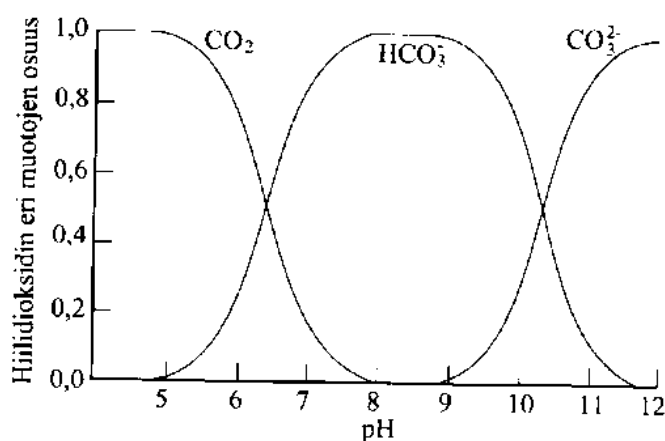
**Kuva 13.** pH:n vaikutus mangaanin hapetukseen (Binnie, et al., 2006, 203).

### 5.3 Hiilidioksidi

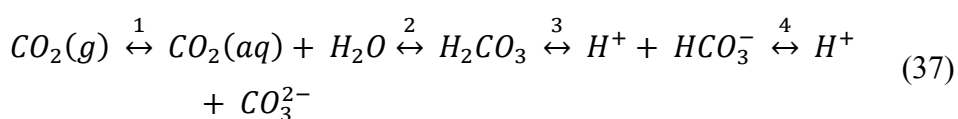
Hiilidioksidi ( $\text{CO}_2$ ) on lähes aina vedessä. Sitä liukenee ilmasta veteen ja lisäksi sitä syntyy mikrobiologisten prosessien toiminnassa. Hiilidioksidin määrä ilmassa on vähäinen, vain noin 0,039103 % eli 391,03 ppm (Pro Oxygen, 2011), mutta sen eri muodot vedessä ( $\text{HCO}_3^-$  ja  $\text{CO}_3^{2-}$ ) kohottavat sen liukoisuutta huomattavasti. (RIL, 2003,

216-217) Hiilidioksidia voi liueta veteen jopa 1700 mg/l, lämpötilan ollessa +20 °C. Pintavesissä hiilidioksidia on kuitenkin yleensä vain 0 – 5 mg/l. (AWWA, 2010, 370)

Kuvassa 14 on esitetty hiilidioksidin eri muotojen välinen tasapaino. Hiilidioksidin eri muotojen väliset tasapainoreaktiot on esitetty yhtälössä (37). Liuennut hiilidioksidi esiintyy vedessä  $\text{CO}_2(\text{aq})$ :na tai hiilihappona ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ).  $\text{CO}_2(\text{aq})$ :n tasapainoreaktio  $\text{H}_2\text{CO}_3$ :n kanssa, mikä yhtälössä (37) on merkitty numerolla 2, on hidas. (Colt, et al., 2012) Hiilidioksidia vedestä poistettaessa vetykarbonaatti ( $\text{HCO}_3^-$ ) ei tämän takia saavuta välittömästi tasapainoa  $\text{CO}_2(\text{aq})$ :n kanssa, minkä takia ilmastusajan ollessa lyhyt ei kaikkea  $\text{CO}_2$ :a saada poistettua. (Hu, et al., 2011)



**Kuva 14.** Hiilidioksidin eri muotojen välinen tasapainotila vedessä (RIL, 2003, 217).



Hiilidioksidia pyritään poistamaan vedestä mm. korroosion takia. Liuennut hiilidioksidi laskee veden pH:ta aiheuttaen korroosiota. Poistamalla sitä vedestä saadaan pH nousemaan. (Binnie, et al., 2006, 52) Lisäksi liuennut hiilidioksidi vaikeuttaa raudan hapettamista ja lisää veden pehmennyksessä kalkin kulutusta. Yleensä ilmastuksella saadaan vähennettyä veden hiilidioksidipitoisuus arvoon 4,5 mg/l. (AWWA, 2010, 370)

Luonnon vesissä hiilidioksidi on suurina määrinä erittäin haitallista. Se vaikeuttaa vesieliöiden hengitystä ja pitoisuuksien ylittäessä 25 mg/l jotkut eliöt saattavat jopa kuolla. (RIL, 2003, 217)



## 5.4 Rikkivety

Rikkivety ( $H_2S$ ) on väritön, helposti syttyvä ja myrkyllinen kaasu. Sille on ominaista pilaantuneen kananmunan haju, mutta suurina määrinä se voi turruttaa ihmisen hajuaistin. Rikkivetyä muodostuu rikkiä sisältävän orgaanisen aineen anaerobisessa hajoamisessa tai sulfiitti- ja sulfaattimineraalien pelkistyessä. Sitä ei synny hapellisissa olosuhteissa. Myrkyllisyyden takia turvallisuuteen tulee kiinnittää erityistä huomiota rikkivetyä käsiteltäessä. (Metcalf & Eddy, 2003, 70)

Rikkivedyn poistamisella pyritään parantamaan veden hajua ja makua, sillä jo pieninä määrinä (0,05 mg/l) se vaikuttaa veden makuun (AWWA, 2010, 370). Lisäksi se voi aiheuttaa korroosiota betoni- ja metalliputkistoissa (US EPA, 1991). Ilmaan päästessään se on myrkyllistä ihmiselle ja voi aiheuttaa jo pieninä määrinä ilmassa (<1 ppm) huomattavaa vahinkoa sähkölaitteille (US EPA, 1991, 1-6).

Rikkivetyä ei ole luonnostaan juuri lainkaan ilmassa, joten se saadaan poistettua vedestä ilmastuksessa lähes kokonaan (Binnie, et al., 2006, 52). Sen poistotehokkuus kuitenkin riippuu pH:sta ja tehokkain poisto saavutetaan pH:n ollessa 6 tai sen alle, jolloin rikkivety on vedessä suurimmaksi osaksi kaasumaisessa muodossa (AWWA, 2010, 393). Sitä voidaan myös hapettaa kemiallisesti, mutta sen reaktio hapen kanssa on melko hidas. Se voi reagoida kiinteäksi rikiksi, polysulfiitiksi tai sulfaatiksi riippuen käytetystä hapettimesta sekä pH:sta ja lämpötilasta. Yhtälöissä (38) ja (39) on esitetty rikkivedyn reaktioyhtälöt hapen kanssa. (Singer & Reckhow, 2011)



## 5.5 VOC

Metcalf & Eddy (2003, 100) ja Sincero & Sincero (2003, 146) määrittelevät haihtuvan orgaanisen yhdisteen (VOC) orgaaniseksi aineeksi, jonka kiehumispiste on +100 °C tai vähemmän ja/tai jonka höyrynpaine +25 °C:ssa on enemmän kuin 1 mmHg. EU-direktiivi (Parlamentin ja neuvoston direktiivi 2004/42/EY) määrittelee VOC-yhdisteen

sellaiseksi orgaaniseksi yhdisteeksi jonka kiehumispiste on normaali-ilmanpaineessa (101,3 kPa) enintään +250 °C. VOCit ovat siis orgaanisia yhdisteitä, joilla on alhainen kiehumispiste.

VOCit ovat erittäin liikkuvia kaasumuodossa, joten niillä on suuri todennäköisyys vapautua ympäristöön. Osa niistä on ilmaan päästessään vaarallisia ihmisten terveydelle. Lisäksi ne lisäävät ilmakehän hiilivetypitoisuutta, mikä voi johtaa fotokemiallisten hapettimien syntymiseen. Jätevesien käsittelyssä VOC-päästöt voivat aiheuttaa haittaa sekä laitteistoille että työntekijöille. (Metcalf & Eddy, 2003, 100; Sincero & Sincero, 2003, 146)

VOC-yhdisteitä voidaan poistaa vedestä ilmastuksella, vaikka ne eivät olekaan yhtä helposti haihtuvia kuin CO<sub>2</sub> tai H<sub>2</sub>S (AWWA, 2010, 371). Erityisesti pakatut ilmastustornit ovat yleisesti käytettyjä VOCien poistamiseen, mutta niitä voidaan poistaa myös muilla ilmastusmenetelmillä. Se, kuinka tehokkaasti VOCEja saadaan poistettua vedestä, riippuu hapensiirtokertoimesta ja yhdisteen Henryn lain vakion arvosta. Hapensiirtokerroin määrittää sen, kuinka tehokkaasti yhdiste siirtyy vedestä ilmaan ja Henryn lain vakio H sen, pystytäänkö yhdiste ylipäättään poistamaan vedestä ilmaan. Suuri H:n arvo tarkoittaa, että yhdiste liukenee veteen niukasti ja se voidaan poistaa vedestä ilmastuksella. (Eckenfelder, 2000, 186)

## 5.6 Metaani

Metaani (CH<sub>4</sub>) on väritön, hajuton ja mauton ilmaa kevyempi kaasu. Veteen liuenneena se kuitenkin tekee siitä valkosipulin makuista. Yleensä metaania esiintyy luonnollisten kaasuesiintymien lähellä sijaitsevilla pohjavesissä. Sitä syntyy myös orgaanisen aineen hapettomassa hajoamisessa (Metcalf & Eddy, 2003, 70). Oikeassa suhteessa ilman kanssa sekoittuessaan metaani on erittäin herkästi syttyvä ja räjähtävä kaasu. Sitä poistetaan juomavedestä, jottei sitä kerääntyisi asiakkaiden koteihin, joissa se aiheuttaisi räjähdysvaaran. Metaani liukenee niukasti veteen, joten se saadaan helposti poistettua ilmastuksella. Vedestä vapautuvan metaanikaasun käsittelyyn tulee kuitenkin kiinnittää erityistä huomiota. (AWWA, 2010, 371)

## 5.7 Radon

Radon (Rn) on väritön, hajuton ja radioaktiivinen syöpää aiheuttava kaasu. Se voi imeytyä ihmisen elimistöön hengitysteitse. Sitä syntyy uraanin luonnollisessa radioaktiivisessa hajoamisessa ja se voi liueta pohjaveteen. Radon vapautuu vedestä helposti ilmaan sekoitettaessa. Suljetuissa tiloissa vedestä vapautunut radon on ihmiselle erittäin vaarallista. (AWWA, 2010, 371-372)

Radonia voidaan poistaa vedestä ilmastuksella (Abulfaraj & Mamoon, 1995; Mamoon, et al., 2004). Salonen et al. (2002) selvittivät useiden erilaisten ilmastuslaitteiden soveltuvuutta radonin poistamiseen pienissä vesilaitoksissa. Tutkimus kattoi useita Suomen, Ruotsin ja Saksan vesilaitoksia. Erityisesti Suomessa ja Ruotsissa kallioperän vesistä on tarpeen poistaa radonia sen suuren pitoisuuden takia. Molemmissa maissa on mitattu 1000 – 2500 Bq/l radonpitoisuuksia. Suomessa radonpitoisuuden raja-arvo vedessä on 300 Bq.

Salosen et al. (2002) tutkimuksissa suurimmalla osalla testatuista ilmastuslaitteistoista saavutettiin tarvittava radonin poisto eli radonpitoisuus vedessä saatiin alle 300 Bq. Erityisesti täyteaineilla pakatut ilmastustornit olivat tehokkaita radonin poistajia. Myös yhdistetyllä diffuusio- ja suihkuilmastimella saavutettiin hyvä radonin poisto. He totesivat myös, että raudan, mangaanin, hiilidioksidin tai rikkivedyn poistoon suunnitellut ilmastuslaitteistot kykenevät poistamaan erittäin hyvin myös radonia.

## 5.8 Arseeni

Arseeni (As) on puolimetalli, joka esiintyy luonnossa tavallisimmin sulfideina ja oksideina. Suomen maaperässä ja pohjavesissä esiintyy luontaisesti korkeita arseenipitoisuuksia. Arseeni ja sen yhdisteet ovat voimakkaita myrkkyjä, jotka voivat aiheuttaa syöpää. Se kerääntyy elimistöön, joten jo pienetkin pitoisuudet voivat olla haitallisia. (RIL, 2003, 221)

US Environmental Protection Agency (2002) selvitti ilmastuksen soveltuvuutta arseenin hapettamiseen. Arseeni on vedessä yleensä As(III)- tai As(V)-muodossa. As(V) on huomattavasti helpompi poistaa vedestä useilla erilaisilla tekniikoilla kuin As(III). Tämän takia As(III) on hapetettava As(V)-muotoon ennen arseenin poistamista.

Ilmastuksen havaittiin kuitenkin olevan huono tapa hapettaa arseenia (As). Kolmella eri vesilaadulla tehdyissä kokeissa vain yhdessä As(III)-pitoisuuden havaittiin laskevan ilmastuksen seurauksena. Heidän mukaansa ilmastus ei kuitenkaan hapettanut As(III):a, vaan se poistui vedessä olevan raudan mukana sen saostuessa. He kuitenkin mainitsevat, ettei tutkimuksessa selvitetty arseenin poistumisen mekanisme ja on mahdollista, että As(III) hapettui As(V):ksi ennen poistumista raudan mukana. Kuitenkin tärkein tekijä arseenin poistamisessa vedestä on raudan saostuminen eikä ilmastuksen seurauksena veteen liennut happi. Heidän johtopäätöksensä on, ettei ilmastus ole tehokas keino As(III):n hapettamiseen. Ilmastuksella voidaan kuitenkin hapettaa rautaa, jonka mukana arseeni poistuu. Myöskään muissa tutkimuksissa liunneen hapen ei ole havaittu hapettavan As(III):a, vaan As(III) hapettuu raudan hapettuessa (Hug & Leupin, 2003; Leupin & Hug, 2005).

## 6 Ilmastuslaitteistot

Ilmastuslaitteistoja on useita erilaisia. Ne voidaan jakaa karkeasti neljään ryhmään: painovoimaisesti toimivat ilmastimet, diffuusio- eli kuplailmastimet, mekaaniset ilmastimet ja paineilmastimet (Dyksen, 2005, 5.2). Seuraavassa esitellään lyhyesti näihin ryhmiin kuuluvia ilmastimia.

### 6.1 Painovoimaisesti toimivat ilmastimet

Painovoiman avulla toimivissa ilmastimissa kaasunsiirto tapahtuu joko hajottamalla vesi pisaroiksi tai levittämällä se ohueksi kalvoksi. Tämä kasvattaa veden ja ilman välistä pinta-alaa parantaen kaasunsiirtoa. Ilmastimet voidaan jakaa neljään ryhmään: suihkutustilastimet, valutuslautailmastimet, kaskadi-ilmastimet ja täyteaineella pakatut ilmastustornit. (Dyksen, 2005, 5.2-5.3)

Suihkuilmastimissa vesi suihkutetaan suuttimen avulla ilmaan, mikä aiheuttaa veden pisaroitumisen parantaen kaasunsiirtoa. Kaskadi-ilmastimissa veden ja ilman kontaktiaikaa ja pinta-alaa taas kasvatetaan antamalla veden valua alas portaalta toiselle ohuena kalvona. Valutuslautailmastimissa ja ilmastustorneissa vesi syötetään ylhäältä, jonka jälkeen sen annetaan valua alas samalla puhaltaen ilmaa alhaalta ylös. Ensin mainituissa vesi valuu alas rei'itettyjä tasoja pitkin hajoten pienemmiksi pisaroiksi ja ilmaa voidaan puhaltaa alhaalta, jolloin aineensiirto tehostuu. Ilmastustorneissa täyteaine mahdollistaa suuren ilman ja veden välisen pinta-alan, mistä tuloksena on tehokas kaasunsiirto. (Dyksen, 2005, 5.2-5.3)

Suihkuilmastimet ovat yleensä tehokkaita hiilidioksidin poistossa ja hapen lisäämisessä (Dyksen, 2005, 5.2). Niitä voidaan käyttää myös raudan ja mangaanin saostamiseen pohjavedestä sekä haihtuvien orgaanisten yhdisteiden (VOC) poistamiseen (RIL, 2004, 373). Valutuslautailmastimilla saavutetaan tehokas hapensiirto sekä hyvä hiilidioksidin, ammoniakkin ja rikkivedyn poisto (Dyksen, 2005, 5.2). Ilmastustorneilla voidaan poistaa vedestä haihtuvia orgaanisia aineita (VOC), hiilidioksidia ja rikkivety. (RIL, 2004, 367).

## 6.2 Diffuusio- eli kuplailmastimet

Diffuusio- eli kuplailmastimissa hapensiirto toteutetaan puhaltamalla ilmakuplia veteen. Ilmastimet voidaan jakaa kolmeen ryhmään: hienosuuttimiset, karkeasuuttimiset ja muut (Metcalf & Eddy, 2003, 431).

Hienosuuttimisissa diffuusioilmastimissa ilmakuplat saadaan aikaan puhaltamalla ilmaa rei'itetyn levyn, kuvun tai kalvon läpi. Levyjen ja kupujen materiaalina käytetään keraamisia tai muovisia aineita. Kalvot voivat olla muovia, kumia tai kangasta. Kaikissa laitteissa puhallettavan ilman tulee olla puhdasta tukkeutumisen estämiseksi. (Metcalf & Eddy, 2003, 432-433)

Karkeasuuttimisissa diffuusioilmastimissa ilma puhalletaan suuttimien tai putkessa olevien reikien kautta. Näin saadaan aikaan suurempia ilmakuplia kuin hienosuuttimisilla diffuusioilmastimilla ja siksi ilmastusteho on huonompi. Ne ovat kuitenkin halvempia ja helpompia hoitaa eikä puhallettavan ilman puhtaudelle ole niin tiukkaa vaatimusta. (Metcalf & Eddy, 2003, 434-435)

Muita diffuusioilmastimia ovat mm. suihkuilmastin, imuilmastin tai u-putki –ilmastin. Suihkuilmastimessa vesi kierrätetään pumpun kautta takaisin ilmastustankkiin syöttäen samalla veden mukana ilmaa. Imuilmastimissa ilmaa imetään pumpun avulla ja se syötetään suurella vauhdilla putken kautta veteen. Putken päässä oleva potkuri sekä ilman suuri nopeus saavat aikaan sekoituksen, joka liuottaa ilmakuplat. U-putki –ilmastin koostuu syvästä kuilusta, joka on jaettu kahteen osaan sisään tulevalle ja ulos menevälle vedelle. Sisään tulevaan veteen puhalletaan suuripaineista ilmaa. Vesi laskeutuu kuilun pohjalle ja nousee sieltä taas ylös. Kuilun pohjalla olevan suuren paineen takia kaikki puhalletun ilman mukana tullut happi liukenee veteen. (Metcalf & Eddy, 2003, 435-436)

## 6.3 Mekaaniset ilmastimet

Mekaanisia ilmastimia on kahden laisia: pintailmastimia ja vedenalaisia ilmastimia. Pintailmastimissa vesi tuodaan ilman kanssa kosketuksiin suihkuttamalla sitä ilmaan pieninä pisaroina juuri veden pinnan alapuolella pyörivän potkurin avulla. Potkuriin voidaan yhdistää putki, jolla suihkutettava vesi saadaan nostettua syvemmältä.

Vedenalaisissa ilmastimissa vettä kauhaistaan pinnalta alaspäin. Mukana vedetään samalla ilmaa, joka liukenee veteen. Molempia laitteistoja käytetään hapen liuottamiseksi veteen. Pintailmastimia voidaan käyttää myös makujen ja hajujen poistamiseen jätevesistä. (Dyksen, 2005, 5.7)

## **6.4 Paineilmastimet**

Paineilmastimia on kahta perustyyppiä. Ensimmäisessä vesi suihkutetaan tankkiin sen yläpäästä samalla kun paineilmaa johdetaan tankkiin. Toisessa veteen puhalletaan pieniä ilmakuplia johtamalla paineilma suoraan paineistettuun putkistoon. Molemmissa tapauksissa happea saadaan liukenemaan sitä enemmän mitä suurempi paine on. Tyypillisesti paineilmastimia käytetään raudan ja mangaanin hapettamiseen. (Dyksen, 2005, 5.7)

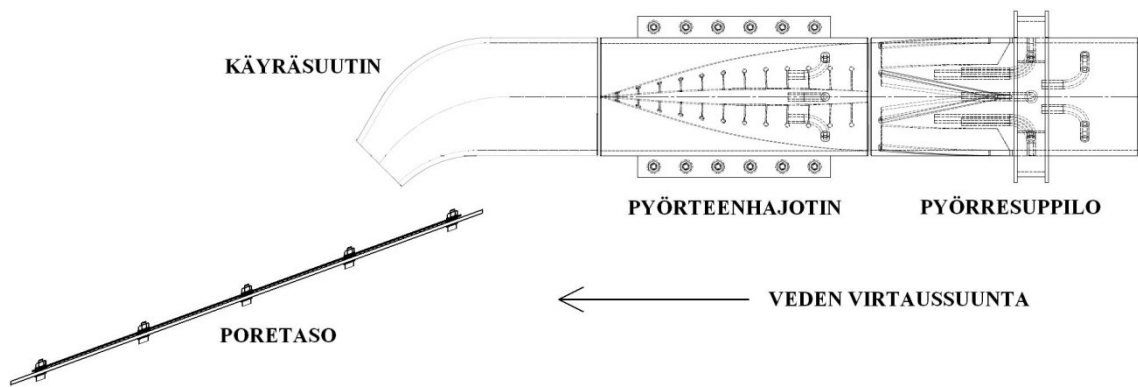
## 7 Tutkimus

Kokeiden suorittamisessa ja mittauksissa on pyritty noudattamaan mahdollisimman suurelta osin ASCE:n (2007) standardin ohjeita. Kuitenkin tutkittavan laitteen luonteesta johtuen standardin noudattaminen ei ollut täysin mahdollista. Kaikissa laskelmissa on käytetty standardissa määriteltäviä standardiolosuhteita, mikä tarkoittaa, että lämpötilana on käytetty +20 °C:ta. Aiemmin teoriaosassa mainittiin, että Euroopassa standardilämpötilana käytettäisiin +10 °C:ta, mutta yhdessäkään eurooppalaisessa tutkimuspaperissa ei tuloksia esitetty +10 °C:ssa vaan +20 °C:ssa. Tästä syystä tämän tutkimuksen tulokset esitetään ASCE:n (2007) standardin mukaisesti +20 °C:ssa.

### 7.1 Laitteisto

Tutkimuksen kohteena olevan hapetuslaitteen prototyyppi koostuu neljästä eri osasta: pyörresuppilo, pyörteenhajotin, käyräsuutin ja poretaso. Periaatekuva hapetuslaitteesta on esitetty kuvassa 15. Pyörresuppilo ja pyörteenhajotin ovat läpinäkyvästä akryylimuovista rakennettuja 250 mm pitkiä putkia, joiden ulkohalkaisija on 110 mm ja sisähalkaisija 100 mm. Käyräsuutin on läpinäkyvästä akryylimuovista rakennetusta 225 mm pitkä putki, jonka ulkohalkaisija on 110 mm ja sisähalkaisija 100 mm, ja joka on taivutettu toisesta päästä 45 asteen kulmaan sekä kuristettu sisähalkaisijaltaan 50 mm:iin. Poretaso on akryylimuovista ja alumiinista rakennettu 550x550 mm:n kokoinen levy. Pyörresuppilossa ja pyörteenhajottimessa olevat ejektoriputket ovat akryylimuovia ja pyörteenhajottimen läppäelementit alumiinia. Testattaessa laitetta eri kokoonpanoilla pyörresuppilo ja pyörteenhajotin voitiin korvata tyhjillä 110x250 mm:n akryylimuoviputkillä.

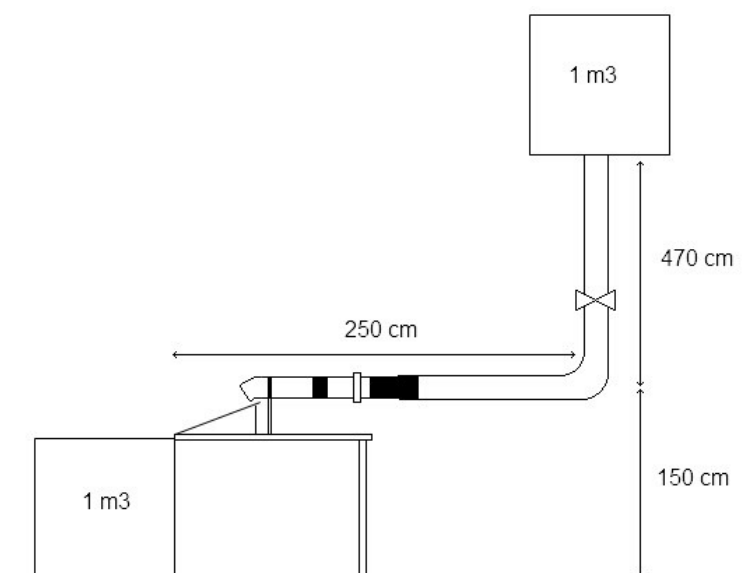




**Kuva 15.** Hapetuslaitteen prototyypin periaatekuva.

Pyörresuppilossa veteen on tarkoitus saada aikaan pyörre putkessa olevilla pyörresiivillä. Pyörteenhajottimella pyörresuppilossa aikaan saatu pyörre hajotetaan useiksi pieniksi pyörteiksi. Molemmissa vaiheissa veteen on tarkoitus imeä ilmaa putkissa olevien pienien ejektoriputkien kautta veden virtausnopeudella aikaan saadun alipaineen avulla. Pyörresuppilossa veteen voidaan kaasunjakorenkassa olevan liitännän kautta lisätä myös muita kaasuja. Pyörresuppilon ja pyörteenhajottimen jälkeen vesi ohjataan kuristetun käyräsuuttimen avulla poretasoon, joka kuplittaa veden.

Hapetuslaitteen ympärille rakennettu tutkimuslaitteisto koostui kahdesta 1 m<sup>3</sup> muovisäiliöstä, joiden väliin laite asennettiin. Toinen säiliöstä asennettiin hallin lattiatasolle ja toinen nostettiin 5,2 metrin korkeuteen (mitattuna säiliön keskikohdasta hapetuslaitteelle). Yläsäiliöltä rakennettiin teräsputkesta (sisähalkaisija 110 mm) yhteys hapetuslaitteistoon. Hapetuslaite asennettiin pöydän ylle niin, että putkiosa nousi pöydän tasosta n. 30 cm ja poretaso asennettiin pöydän toiseen päähän 20 asteen kulmaan. Laitteen jälkeen vesi valui poretasoa pitkin alasäiliöön, jossa oli uppopumppu veden pumppaamiseksi takaisin yläsäiliöön. Kuvassa 16 on esitetty kaavakuva testilaitteistosta.



**Kuva 16.** Kaavakuva testilaitteistosta.

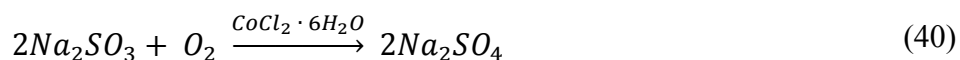
## 7.2 Kokeiden suoritus ja mittaukset

Kokeet suoritettiin laskemalla puhdasta Oulun veden hanavettä laitteiston läpi yläsäiliöstä alasäiliöön. Alussa alasäiliöön laskettiin hanasta 1 m<sup>3</sup> vettä, josta liuenut happi poistettiin kemikaaleilla. Tämän jälkeen vesi pumpattiin yläsäiliöön. Pumppaus kesti noin 12 minuuttia. Liuenneen hapen pitoisuus vedessä mitattiin ensin yläsäiliöstä ja veden tultua laitteiston läpi alasäiliöstä. Tämän jälkeen vesi pumpattiin takaisin yläsäiliöön, josta se laskettiin uudestaan laitteiston läpi alasäiliöön. Liuenneen hapen pitoisuus mitattiin kuten edellä. Vesi laskettiin laitteiston läpi niin monta kertaa, että liuenneen hapen pitoisuus vedessä saavutti kyllästyspitoisuuden.

ASCE:n (2007) standardin mukaan veden liuenneen hapen pitoisuutta tulisi mitata jatkuvatoimisesti hapetuksen ollessa käynnissä niin kauan, että saavutetaan kyllästyspitoisuus. Tämä ei kuitenkaan tutkittavalla laitteella ollut mahdollista, sillä vesimäärä laskettiin laitteen läpi eikä liuenneen hapen pitoisuutta voitu mitata läpilaskun aikana vaan, se jouduttiin mittaamaan joka läpilaskun jälkeen. Eräs mahdollisuus olisi ollut kierrättää vettä jatkuvasti laitteiston läpi niin, että alasäiliöstä vesi olisi pumpattu yläsäiliöön. Toinen vaihtoehto olisi ollut, että vettä olisi kierrätetty pumpun avulla vain yhtä säiliötä käyttäen laitteen läpi. Kumpaankin vaihtoehtoon olisi kuitenkin tarvittu todella iso pumppu, jolla laitteiston vaatimia isoja virtausmääriä olisi saatu pumpattua yläsäiliön tyhjenemättä tai alasäiliön vuotamatta yli.

### 7.2.1 Kemikaalien lisääminen

Testattavasta vedestä poistettiin kokeen alussa happi natriumsulfiitilla ( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ , VWR BDH Prolabo, Purified 99 %), joka reagoi hapen kanssa yhtälön (40) mukaisesti muodostaen natriumsulfaattia ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ). Katalyyttinä reaktiossa käytettiin kobolttia, joka lisättiin veteen kobolttikloridin ( $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , VWR BDH Prolabo, Analytical Reagent 99 %) muodossa. Kobolttikloridin lisääminen tehtiin ennen natriumsulfiittia. Kobolttikloridi liuotettiin pieneen määrään lämmintä vettä ennen sen lisäämistä vesisäiliöön. Säiliötä sekoitettiin kobolttikloridin tasaisen liukenemisen varmistamiseksi. Natriumsulfiitti lisättiin säiliöön jauheena ja säiliötä sekoitettiin tasaisen liukenemisen varmistamiseksi. Happipitoisuus mitattiin ja sekoitusta jatkettiin, kunnes happipitoisuus oli tasaisesti laskenut kaikkialla säiliössä.



Tarvittava natriumsulfiittimäärä laskettiin yhtälöstä (41), joka on johdettu yhtälön (40) mukaisen stoikiometrian mukaan. Kobolttikloridia lisättiin veteen niin, että veden kobolttipitoisuus oli noin 0,1 mg/l.

$$m_{\text{Na}_2\text{SO}_3} = 2 \frac{M_{\text{Na}_2\text{SO}_3}}{M_{\text{O}_2}} C V \quad (41)$$

missä  $m_{\text{Na}_2\text{SO}_3}$  on natriumsulfiitin massa [g],  
 $M_{\text{Na}_2\text{SO}_3}$  on natriumsulfiitin moolimassa [g/mol],  
 $M_{\text{O}_2}$  on hapen moolimassa [g/mol],  
 $C$  on hapen pitoisuus vedessä [g/l] ja  
 $V$  on veden tilavuus [l].

Natriumsulfiittia lisättiin jokaisen uuden kokeen alussa veden happipitoisuuden laskemiseksi. Kobolttikloridia lisättiin veteen vain, kun koe aloitettiin uudella vedellä, sillä se toimi natriumsulfiitin ja hapen välisessä reaktiossa katalyyttinä eikä sen pitoisuus tämän vuoksi vedessä muuttunut.

### **7.2.2 Liuenneen hapen mittaaminen**

Veden liuenneen hapen pitoisuuden mittaamiseen käytettiin WTW:n Oxi 340 mittaria sekä Cellox 325 galvaanista happianturia. Mittarin kalibrointi suoritettiin WTW:n OxiCal® - SL:llä ennen jokaista koetta. Mittaukset tehtiin ylä- ja alasäiliöstä joka läpilaskukerta keskeltä säiliötä. Mittaria heiluteltiin mitattaessa, jotta varmistettiin riittävä veden virtaus anturille. Mittauksen kesto oli noin minuutin tai kunnes mittarin lukema oli tasoittunut. Yläsäiliöstä mittaus tehtiin juuri ennen läpilaskua ja alasäiliöstä veden tultua laitteen läpi ja liikehännän rauhoituttua. Lukema kirjattiin 0,5 mg/l tarkkuudella.

Tutkimuksessa käytettiin vain yhtä liuenneen hapen mittaria, vaikka ASCE:n (2007) standardissa kehoitetaan käyttämään vähintään neljää happianturia. Standardissa kuitenkin mainitaan, että käytettävien antureiden määrä riippuu mm. ilmastustankin koosta. Tässä tutkimuksessa pienestä säiliöstä mittaaminen onnistui yhden anturin avulla. Lisäksi säiliöstä mitattiin liuenneen hapen pitoisuus vain joka läpilaskukerran jälkeen, jolloin happianturin liikuttaminen eri paikkaan säiliössä oli mahdollista ja hapen liukeneminen tasaisesti koko vesimäärään voitiin varmistaa.

### **7.2.3 Veden ja ilman lämpötilan sekä ilmanpaineen mittaaminen**

Veden lämpötila mitattiin WTW:n Oxi 340 mittarin sekä Cellox 325 anturin avulla. Lämpötila mitattiin jokaisen kokeen alussa ja lopussa ja näiden keskiarvoa käytettiin laskennassa. Ilman lämpötila koehallissa mitattiin elohopeamittarilla. Ilmanpaine kokeen aikana saatiin Ilmatieteenlaitoksen internetsivuilta.

### **7.2.4 pH:n ja sähkönjohtavuuden mittaaminen**

Veden pH ja sähkönjohtavuus mitattiin Accumet model 20 pH- ja sähkönjohtavuusmittarilla vedestä otetusta näytteestä sekä kokeen alussa ennen natriumsulfiitin lisäämistä että lopussa hapetuksen jälkeen. Näyte otettiin puolen litran muoviasiaan ja mittaus tehtiin välittömästi näytteenoton jälkeen. Sähkönjohtavuuden avulla voitiin arvioida TDS eli veteen liuenneiden mineraalien määrä.

### 7.2.5 Ilma- ja happivirran mittaaminen

Syötetyn ilmavirran paine mitattiin SMC:n EAR2000-F02 painesäätimellä. Happivirran paine säädettiin Linden HiQ-painesäätimellä ja tilavuusvirta mitattiin Kytölän EH-5FR-HV rotametrillä, jonka mitta-alue oli 10 – 90 l/min.

### 7.2.6 Veden laatu

Puhtaalla vedellä suoritetuissa kokeissa käytettiin Oulun Veden talousvettä. Sen koostumus on esitetty taulukossa 5, jonka lähteenä on käytetty Oulun Veden internetsivuilta löytyviä talousveden laatumäärittäyksiä (Oulun vesi, 2012).

**Taulukko 5.** Oulun Veden talousveden koostumus (Oulun vesi, 2012).

Ominaisuus	Mitattu arvo
Alkaliteetti (mmol/l)	0,69
Alumiini (mg/l)	0,02
Ammonium (mg/l)	0,084
Hiilidioksidi (mg/l)	0,1
Kloori, kokonais (mg/l)	0,34
Kloridi (mg/l)	1,5
Kokonaiskovuus (°dH)	0,95
Mangaani (mg/l)	0,01
pH	8,2
Rauta (mg/l)	< 0,02
Sameus (FTU)	0,13
Sulfaatti (mg/l)	51
Sähkönjohtavuus (mS/m)	21,7
TOC (mg/l)	1,3
Väriluku (mg/lPt)	< 5

### 7.2.7 Veden tarkkailu

Veden käyttäytymistä laitteiston eri osissa tarkkailtiin sekä silmämääräisesti että kameralla. Kamerana käytettiin Canonin Finepix HS10 -kameraa. Kameran avulla

otettiin sekä valokuvia että videokuvaa ja näiden avulla tarkkailtiin mm. veden virtausta laitteistossa.

### ***7.2.8 Lämpilaskuajan mittaaminen***

Lämpilaskuaika mitattiin sekuntikellolla. Ajanotto oli haastavaa nopean virtauksen takia. Laskelmissa on käytetty kokeen loppumisaikana keskimääräistä aikaa väliltä jolloin putki laitteen kohdalla ei ollut enää täynnä vettä ja suurin liikehdintä alasäiliössä oli lakannut.

## **7.3 Suoritetut kokeet**

Koelaitteiston käyttöönotossa havaittiin useita ongelmia. Hapetuslaitteen prototyypin havaittiin muun muassa vuotavan eikä ejektori-imu toiminut. Ennen varsinaisten hapetuskokeiden aloittamista hapetuslaitetta pyrittiin testaamaan ja korjaamaan oikean toiminnan varmistamiseksi.

### ***7.3.1 Laitteiston käyttöönotto***

Laitetta ensimmäistä kertaa testattaessa huomattiin, että ejektori-imu ei toiminut, vaan vesi suihkusi ulos pyörresuppilon ja pyörteenhajottimen ejektoriputkista. Putken päässä olevan virtausta kuristavan käyräsuuttimen arveltiin aiheuttavan ylipaineen ejektoreihin, eikä imua tästä syystä syntynyt. Käyräsuutin ja poretaso päätettiin testata erillään muista osista. Lisäksi laitteen osien liittämiseksi suunnitellut moduuliliittimet vuotivat eikä niitä pystytty käyttämään. Näiden tilalle tehtiin kumista liitinrenkaat, joilla laitteen osat liitettiin toisiinsa ja kiristettiin paikoilleen kiristyspannoilla.

Käyräsuutin poistettiin pyörresuppilon ja pyörteenhajottimen perästä ja korvattiin 30 asteen kulmassa alaspäin olevalla viemäriputkella, joka ohjasi veden alasäiliöön. Viemäriputki ei kuristanut virtausta mitenkään, vaan sen halkaisija oli sama kuin laitteiston putkien. Tästä huolimatta ejektori-imua ei syntynyt laitetta testattaessa, vaan vesi suihkusi ejektoriputkista ulos. Lisäksi teräsputken ja pyörresuppilon välisen kumista valmistetun liitännän havaittiin paisuvan merkittävästi virtaavan veden aiheuttaman paineen vaikutuksesta. Tämän mahdollinen vaikutus ejektori-imuun pyrittiin korjaamaan estämällä paisunta kiristyspannoilla.

Vuotojen poistaminen ja kumiosien paisunnan estäminen eivät saaneet aikaan imua ejektoreissa. Laitteistoa testattiin myös ilman päässä olevaa viemäriputkea, jotta sen mahdollinen vaikutus voitaisiin sulkea pois. Tälläkään tavalla ejektorin imua ei saatu aikaan. Tämän jälkeen teräsputken ja pyörresuppilon välistä kumiosaa päätettiin kuristaa. Kuristaminen sai pyörresuppilon aikaan alipaineen, joka aiheutti neljään ensimmäiseen ejektoriin imun. Kaasunjakorenkkaan ja pyörteenhajottimen ejektorit eivät kuitenkaan toimineet. Kaasunjakorenkkaasta ei kuitenkaan suihkunnut vettä ulos ja pyörteenhajottimen ejektoreistakin pulppusi vain pieniä määriä vettä.

Kumiosan kuristaminen enemmän n. 10 sentin matkalta ennen pyörresuppiloa sai neljä ensimmäistä ejektoria toimimaan ja myös kaasunjakorenkkaan ejektorit vaikuttivat imevän ilmaa. Pyörteenhajottimen ejektorit eivät kuitenkaan edelleenkään toimineet. Koska osa ejektoreista saatiin toimimaan, päätettiin kumiosaa kuristaa vielä lisää imun parantamiseksi ja tehdä ensimmäiset koeajot kyseisellä kokoonpanolla hapetustehon mittaamiseksi.

### **7.3.2 Kokeet**

Kumiosaa kuristettiin niin, että sen halkaisija oli noin 80 mm. Näin saatiin heikko, mutta selkeä imu kaikkiin pyörresuppilon ejektoreihin. Pyörteenhajottimen ejektorit eivät edelleenkään toimineet, vaan niistä pulppusi pieniä määriä vettä. Pyörresuppilon ja pyörteenhajottimen jälkeen alaspäin 30 asteen kulmassa kääntyvä viemäriputki ohjasi veden poretasoon. Tällä kokoonpanolla tehtiin ensimmäiset hapetuskokeet, minkä jälkeen kuristuksen vaikutusta hapetustehoon päätettiin tutkia poistamalla kuristus ennen pyörresuppiloa ja teippaamalla ejektorit tukkoon veden suihkuamisen estämiseksi. Laitteiston kokoonpano pidettiin muuten samana. Tämän jälkeen kokeita tehtiin myös ilman laitteiston eri osia.

Seuraavissa kokeissa yläsäiliöltä lähtevään putkeen syötettiin paineilmaa samalla, kun vesi laskettiin laitteiston läpi. Tällä tavoin voitiin tutkia ilman vaikutusta hapensiirtoon vaikka ejektorin imu ei toiminutkaan. Ilma syötettiin yläsäiliöstä mahdollisimman suuren viipymäajan saavuttamiseksi. Pyörresuppilon ja pyörteenhajottimen ejektorit olivat teipattuina eikä laitteistossa ollut kuristusta.

Paineilman ja hapen vaikutusta veden hapetukseen tutkittiin seuraavaksi lisäämällä niitä pyörresuppiloon kaasunjakorenkään liitännän kautta. Tällä haluttiin selvittää pyörresuppilon sekä pyörteenhajottimen merkitys hapen liuottamisessa. Laitteen muut ejektorit olivat teipattuina kiinni. Kaikkien suoritettujen kokeiden laitteistokokoonpanot on esitetty taulukossa 6.

**Taulukko 6.** Suoritettujen kokeiden laitteistokokoonpanot.

Koe	Pyörresuppilo	Pyörteen hajotin	Käyräsuutin ohjain (kuristus, 45°)	Poretaso	Viemäriputki ohjain (30°)	Kuristus ennen pyörresuppiloa	Ejektorit teipattu	Paineilman syöttö yläsäiliössä	Paineilman syöttö pyörresuppiloon	Hapen syöttö pyörresuppiloon
1	x	x	-	x	x	x	-	-	-	-
2	x	x	-	x	x	x	-	-	-	-
3	x	x	-	x	x	-	x	-	-	-
4	x	x	-	-	x	-	x	-	-	-
5	x	x	x	x	-	-	x	-	-	-
6	-	-	-	-	x	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	x	-	-	-	-	-
8	x	x	-	-	x	-	x	x	-	-
9	x	x	-	-	x	-	x	x	-	-
10	x	x	-	-	x	-	x	-	x	-
11	x	x	-	-	x	-	x	-	-	x
12	x	x	-	-	x	-	x	-	-	x
13	x	x	-	-	x	-	x	-	x	-

## 7.4 Tulokset

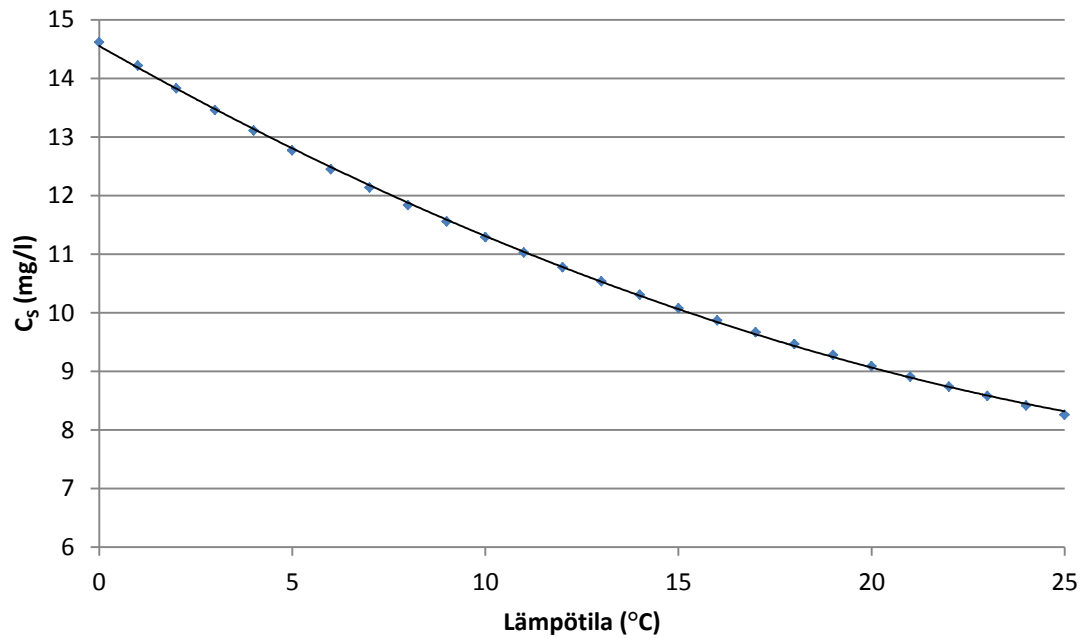
Kokeiden tulokset on esitetty taulukossa 7. Liuenneen hapen pitoisuus on esitetty joka läpilaskukerran jälkeen ja läpilasku 0 tarkoittaa liuenneen hapen pitoisuutta vedessä ennen koetta.  $K_{La}$ :n ja  $C_S$ :n määrittämiseen on käytetty osassa 4.3.1 esitettyä epälineaarista regressiomenetelmää. Tämä tehtiin Excelissä Brownin (2001) ohjeiden mukaisesti SOLVER -työkalulla, joka käyttää GRG algoritmia parhaan sovituksen löytämiseen.  $K_{La20}$  ja  $SOTR_{20}$  on laskettu yhtälöiden (20), (25) ja (26) avulla. Veden tilavuutena laskennassa oli 1000 litraa ja geometrinen lämpötilakerroin ( $\theta_G$ ) oli 1,024. Yhtälön (26) mukaiset korjauskertoimet  $\tau$  ja  $\Omega$  on määritetty yhtälöiden (13) ja (15)



mukaisesti. Laskelmissa tarvittu kyllästyspitoisuuden taulukkoarvot on otettu ASCE:n standardista (2007) kuvan 17 ja yhtälön (42) mukaisesti. Standardi-ilmanpaine ( $p_s$ ) laskuissa oli 101,3 kPa.

**Taulukko 7.** Suoritetujen kokeiden tulokset.

Läpilasku	Liuenneen hapen pitoisuus (mg/l)												
	Koe												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0	4,90	0,50	0,70	0,65	0,60	0,60	0,80	0,90	0,80	0,5	1,05	1,05	0,7
1.	7,75	6,15	6,70	6,80	7,60	7,55	7,60	7,05	7,60	7,85	7,95	8,4	7,2
2.	8,85	8,25	8,50	8,75	9,80	9,90	9,75	8,85	10,10	10,3	10,15	10,65	9,05
3.	9,25	9,10	9,05	9,25	10,45	10,60	10,35	9,25	10,70	11,1	10,8	11,3	9,6
4.	9,40	9,40	9,25	9,40	10,60	10,75	10,55	9,35	10,85	11,3	10,95	11,5	9,75
5.	-	9,50	-	9,45	10,60	-	10,55	-	-	11,3	10,95	11,5	9,75
$C_s$ (mg/l)	9,50	9,58	9,31	9,49	10,71	10,92	10,62	9,43	11,05	11,41	11,04	11,57	9,79
$T_{\text{vesi}}$ (°C)	17,0	16,9	17,8	18,2	12,4	11,7	13,3	19,2	11,7	12,1	15	15,9	16,4
$p_b$ (kPa)	100,98	98,59	98,69	101,33	100,71	99,85	99,90	101,36	101,23	102,65	100,96	100,97	100,82
Läpilaskuaika (s)	60	60	30	30	60	25	25	30	30	30	30	30	30
$K_{La}$ (1/s)	0,016	0,016	0,040	0,040	0,020	0,045	0,048	0,043	0,037	0,038	0,040	0,040	0,042
$\tau$	1,06	1,06	1,04	1,03	1,17	1,19	1,15	1,01	1,19	1,18	1,11	1,09	1,07
$\Omega$	1,00	0,97	0,97	1,00	0,99	0,99	0,99	1,00	1,00	1,01	1,00	1,00	1,00
$C_{s20}$ (mg/l)	8,99	9,27	9,17	9,18	9,17	9,28	9,36	9,30	9,26	9,52	10,01	10,70	9,16
$K_{La20}$ (1/s)	0,017	0,017	0,042	0,042	0,024	0,055	0,056	0,043	0,045	0,045	0,045	0,044	0,046
SOTR <sub>20</sub> (kg/d)	13,5	13,9	33,2	33,2	18,9	44,2	45,1	34,4	36,2	37,4	38,5	41,0	36,1



**Kuva 17.** Liuenneen hapen kyllästyspitoisuus lämpötilan funktiona ( $R^2 = 0,9997$ ) (ASCE, 2007).

$$C_{ST} = 0,005T^2 - 0,3744T + 14,552 \quad (42)$$

missä  $C_{ST}$  on hapen kyllästyspitoisuus lämpötilassa  $T$ .

Ilmastustehokkuutta ( $SAE_{20}$ ) arvioitiin kahdella eri tavalla. Veden pumppaukseen käytetty energia mitattiin minkä lisäksi korkeuseron potentiaalienergia laskettiin. Veden pumppaus alasäiliöstä yläsäiliöön kulutti 0,155 kWh energiaa pumppausta kohti. Potentiaalienergia laskettiin kaavasta  $E_p = mgh$ , missä  $m$  on 1000 kg,  $g$  on  $9,81 \text{ m/s}^2$  ja  $h$  on 5,2 m. Korkeutena ( $h$ ) käytettiin korkeutta laitteelta yläsäiliön puoleenväliin.  $SAE_{20}$  laskettiin kertomalla hapensiirtonopeus  $SOTR_{20}$  (kg/s) yhteen läpilaskuun kuluvalle ajalle ja jakamalla tämä energialla. Tulokset on esitetty taulukossa 8.  $SAE_{20}(1)$  on laskettu pumppausenergian avulla ja  $SAE_{20}(2)$  potentiaalienergian avulla.

**Taulukko 8.** Ilmastustehokkuus pumppausenergian ja potentiaalienergian mukaan.

Koe	SAE <sub>20</sub> (1) (kg/kWh)	SAE <sub>20</sub> (2) (kg/kWh)
1	0,06	0,66
2	0,06	0,68
3	0,07	0,81
4	0,07	0,81
5	0,08	0,86
6	0,08	0,90
7	0,08	0,92
8	0,08	0,84
9	0,08	0,89
10	0,08	0,92
11	0,09	0,94
12	0,09	1,00
13	0,08	0,88

Hapensiirtotehokkuus (SOTE<sub>20</sub>) kokeissa 10 – 13 laskettiin yhtälön (21) avulla. Mitatut ilma- ja happivirrat muutettiin ASCE:n (2007) standardin mukaisesti standardiolosuhteisiin yhtälön (43) avulla. Tämän jälkeen tilavuusvirta on muunnettu massavirraksi käyttämällä ilman tiheytenä 1,20 kg/m<sup>3</sup> ja hapen tiheytenä 1,33 kg/m<sup>3</sup>. Ilman tapauksessa massavirta on vielä kerrottu 0,23:lla, jolloin on saatu hapen massavirta. Tulokset on esitetty taulukossa 9.

$$Q_s = Q T_s p_b / T p_s \quad (43)$$

missä,

- $Q_s$  on ilma- tai happivirta standardiolosuhteissa [m<sup>3</sup>/s],
- $Q$  on mitattu ilma- tai happivirta [m<sup>3</sup>/s],
- $T_s$  on ilman lämpötila standardiolosuhteissa (293 K),
- $p_b$  on mitattu ilmanpaine (kPa),
- $T$  on mitattu ilman lämpötila (K) ja
- $p_s$  on ilmanpaine standardiolosuhteissa (101,3 kPa).

**Taulukko 9.** Ilman lämpötila, ilman ja hapen tilavuus- ja massavirrat sekä hapensiirtotehokkuus.

Koe	T <sub>ilma</sub> (°C)	Ilmavirta (l/min)	Happivirta (l/min)	Q <sub>s</sub> (m <sup>3</sup> /s)	W <sub>O2</sub> (kg/s)	SOTE <sub>20</sub> (%)
10	20	30	-	0,00047	0,00013	333,0
11	20	-	30	0,00047	0,00062	71,9
12	20	-	60	0,00093	0,00124	38,3
13	19	60	-	0,00093	0,00026	160,7

Sähkönjohtavuus ja pH mitattiin seitsemässä ensimmäisessä testissä ja tulokset on esitetty taulukossa 10. Mitatun sähkönjohtavuuden avulla voitiin arvioida veteen liuenneiden mineraalien määrää eli TDS:ää. Metcalfin & Eddyn (2003, 56) mukaan TDS (mg/l) voidaan arvioida sähkönjohtavuuden (μS/cm) perusteella kaavan (44) mukaisesti. Taulukossa 10 esitettyjen TDS-arvojen laskennassa on sähkönjohtavuuden kertoimena 0,7.

$$TDS (mg/l) \cong Sähkönjohtavuus (\mu S/cm) \times (0,55 - 0,70) \quad (44)$$

**Taulukko 10.** pH, sähkönjohtavuus ja TDS seitsemän ensimmäisen kokeen alussa ja lopussa.

Koe	pH		Sähkönjohtavuus (μS/cm)		TDS (mg/l)	
	Alussa	Lopussa	Alussa	Lopussa	Alussa	Lopussa
1	8,00	7,67	219	450	153	315
2	8,25	7,98	191	336	134	235
3	7,98	7,84	336	447	235	313
4	7,80	7,85	446	559	312	391
5	7,98	7,82	169	291	118	204
6	8,39	8,10	165	294	116	206
7	8,10	7,84	294	415	206	291

## 8 Tulosten tarkastelu

### 8.1 Hapensiirtonopeus

Kokeet 1 ja 2 tehtiin kuristuksen kanssa, mikä sai aikaan imun pyörresuppilon ejektoreihin. Kuristus antoi lupaavia tuloksia, mutta kuristuksen aiheuttaman ejektorin todellinen merkitys haluttiin selvittää ja kuristus poistettiin. Kokeessa 3 ejektorit jouduttiin teippaamaan kiinni, jottei vesi suihkuaisi niistä ulos, mutta kokoonpano oli muuten sama kuin kokeissa 1 ja 2. Läpilaskuaika oli puolet lyhyempi ja  $SOTR_{20}$  yli kaksi kertaa suurempi. Koe 4 tehtiin muuten samalla kokoonpanolla, mutta ilman poretasoa, jotta sen mahdollista vaikutusta hapetukseen voitiin arvioida. Koe 4 antoi saman tuloksen kuin koe 3, mistä voidaan päätellä, että lyhyempi läpilasku aika vaikuttaa positiivisesti hapensiirtonopeuteen. Poretasolla taas ei vaikuttanut olevan merkitystä hapensiirtonopeuteen.

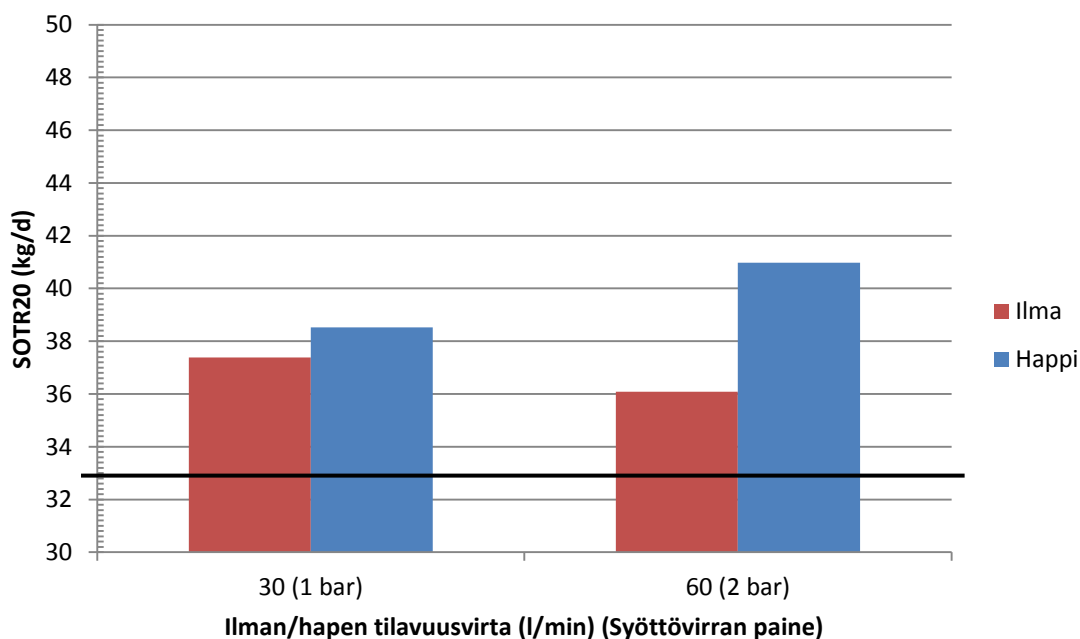
Koetta 5 varten putken päähän asennettiin käyräsuutin, jonka kuristi virtausta niin, että ulostulossa suuttimen halkaisija oli puolet pyörresuppilon ja pyörteenhajottimen halkaisijasta. Lisäksi käyräsuutin teki 45 asteen kulman ja ohjasi näin veden poretasoon, joka asennettiin taas paikoilleen. Läpilaskuaika nousi jälleen minuuttiin käyräsuuttimen kuristuksen takia, mutta tästä huolimatta hapensiirtonopeus oli suurempi kuin kokeissa 1 ja 2. Tämä voitaneen selittää sillä, että käyräsuuttimen lisääminen putken päähän aiheutti suuremman nopeuden putkesta alasäiliöön purkautuvalle vedelle. Vaikka kokeissa 1, 2 ja 5 läpilaskuaika oli sama, käyräsuutin kiihdytti veden lopussa alasäiliöön, kun taas kuristus ennen pyörresuppiloa ei tätä tehnyt. Verrattaessa tulosta kokeeseen 3, joka tehtiin muuten samalla kokoonpanolla, mutta ilman käyräsuutinta, havaitaan, että kokeen 3  $SOTR_{20}$  on yli puolet suurempi. Tässä vaiheessa alkoi näyttää siltä, ettei itse hapetuslaitteen osilla ollut juurikaan merkitystä hapetukseen, vaan veden hapetus tapahtui suurimmaksi osaksi alasäiliössä veden purkautuessa sinne suurella nopeudella putkesta. Tätä päätettiin testata seuraavaksi.

Kokeet 6 ja 7 tehtiin ilman mitään laitteiston osia. Pyörresuppilon ja pyörteenhajottimen tilalle asennettiin tyhjät akryyliputket ja poretaso poistettiin. Läpilaskuaika saatiin 5 sekuntia pienemmäksi kuin kokeissa 3 ja 4, kun mikään ei enää hidastanut veden virtausta putkessa.  $SOTR_{20}$  oli kaikista kokeista suurin. Se oli yli kolme kertaa suurempi kuin mitä kuristuksella saavutettu ja kolmanneksen suurempi kuin kokeessa 4, jossa

kokoonpano oli muuten sama, mutta tyhjien akryyliputkien paikalla oli pyörresuppilo ja pyörteenhajotin ejektorit teipattuina.

Koska laitteen ejektori-imu ei toiminut, päätettiin veteen lisätä paineilmaa, jotta ilman lisäämisen vaikutusta hapetukseen voitaisiin arvioida. Kokeet 8 ja 9 tehtiin pyörresuppilo ja pyörteenhajotin asennettuina ilman poretasoa. Paineilma päätettiin syöttää yläsäiliöltä lähtevään putkeen. Näin ilmalle saatiin mahdollisimman pitkä viipymäaika vedessä. Ilmaa pyrittiin syöttämään mahdollisimman vähän, sillä alustavissa testeissä huomattiin, että liika ilma pidensi olennaisesti läpilaskuaikaa. Tuloksista voidaan nähdä, että ilman lisäämisen vaikutus hapetusnopeuteen on hyvin pieni. Verrattaessa kokeita 8 ja 9 kokeeseen 4, jossa laitteiston kokoonpano oli täysin sama, mutta ilman paineilman syöttöä, nähdään, että paineilman tuoma parannus  $SOTR_{20}$ :een on alle 10 prosenttia.

Kokeissa 10 ja 13 pyörresuppiloon syötettiin kaasunjakorenkään kautta paineilmaa ja kokeissa 11 ja 12 happea. Tällä tavoin pyörresuppilon ja pyörteenhajottimen todellista vaikutusta hapensiirtoon voitiin arvioida. Kuvassa 18 on esitetty  $SOTR_{20}$  ilman ja hapen eri tilavuusvirroilla sekä ilmoitettu syötetyn ilman/hapen paine. Kuvan musta viiva on kokeen 4 tulos, joka saatiin muuten samalla kokoonpanolla, mutta ilman paineilman tai hapen syöttöä. Voidaan nähdä, että ilman tai hapen syöttö parantaa  $SOTR_{20}$ :ta. Tulosten perusteella  $SOTR_{20}$  näytti nousevan happivirran kasvaessa ja oli enimmillään 23,5 % suurempi kuin ilman hapen syöttöä. Paineilmaa lisäämällä  $SOTR_{20}$  oli 12,7 % suurempi, mutta ilmavirran kasvattaminen 30:sta 60:een l/min ei tulosten perusteella enää parantanut  $SOTR_{20}$ :ta. Sekä hapen että ilman lisääminen pyörresuppiloon ei kuitenkaan tuottanut samanlaisia tuloksia kuin tyhjällä putkella kokeissa 6 ja 7, vaan niistä jäätiin noin 9 %.

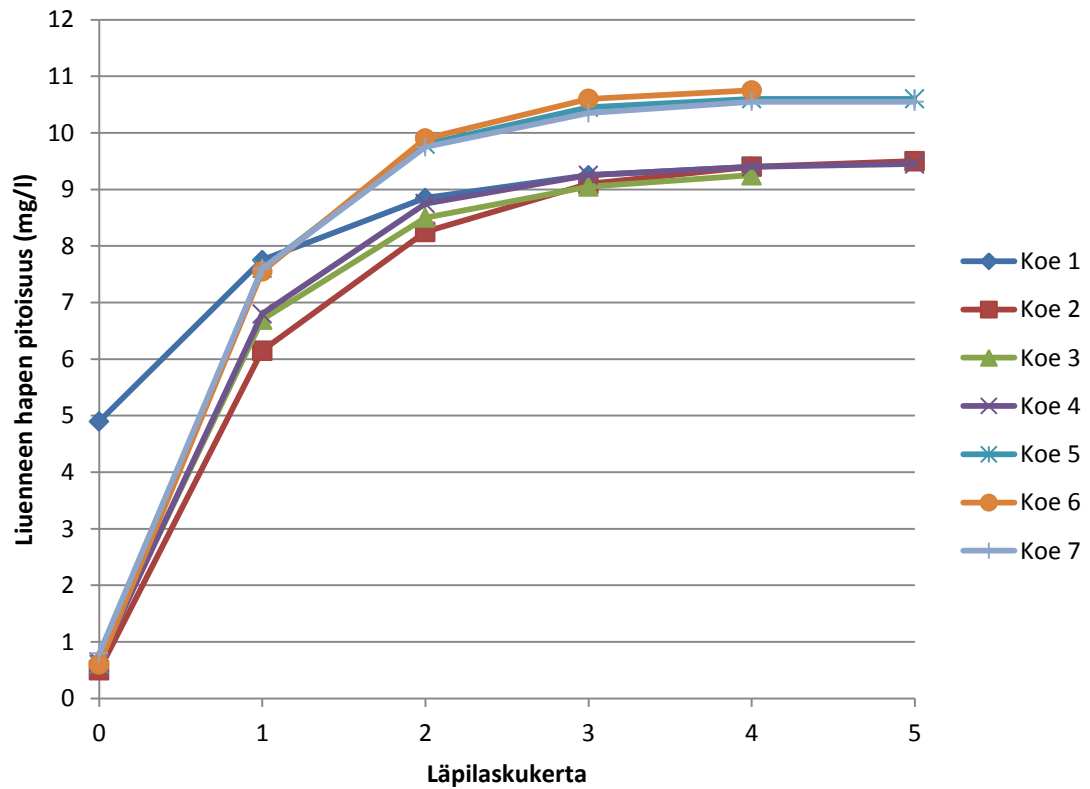


**Kuva 18.** SOTR<sub>20</sub> ilman/hapen tilavuusvirran mukaan.

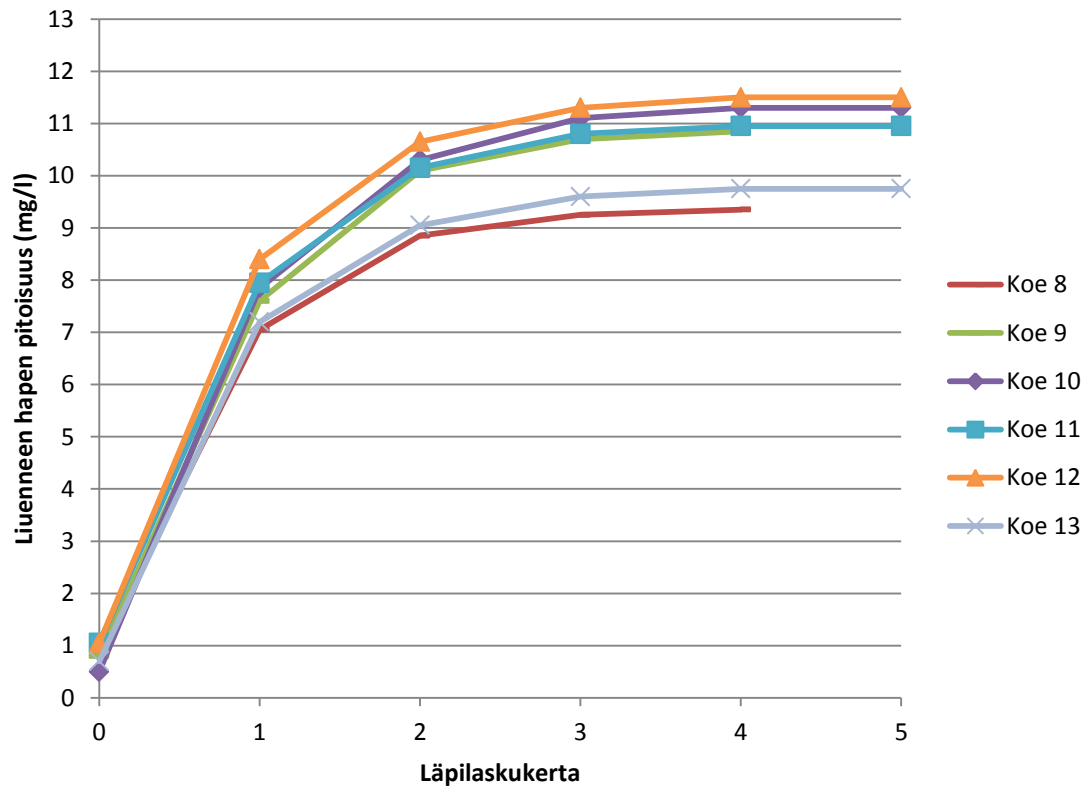
Sassi ja Keto (2005) testasivat kahdeksan eri ilmastuslaitetta, joiden SOTR<sub>20</sub> vaihteli välillä 2,9 – 109,7 kg/d. W-rix Oy:n (2012) ilmastuslaitteiden ilmoitettu hapensiirtonopeus on välillä 12 – 1690 kg/d. Tämän tutkimuksen paras tulos, pois lukien tyhjällä putkella tehdyt testit, saavutettiin syöttämällä happea pyörresuppiloon, jolloin SOTR<sub>20</sub> oli 41,0 kg/d. Tämä on parempi kuin viiden Sassin ja Kedon (2005) testaaman ilmastuslaitteen SOTR<sub>20</sub>. W-rix Oy:n (2012) ilmastuslaitteiden hapensiirtonopeudet ovat yhtä lukuun ottamatta huomattavasti suurempia kuin tässä testissä saavutetut.

## 8.2 Läpilaskukertojen vaikutus

Edellä laitteiston suorituskykyä on arvioitu SOTR<sub>20</sub> mukaan, mutta laitteiston luonteesta johtuen on syytä myös tarkastella yhden läpilaskukerran vaikutusta liuenneen hapen pitoisuuteen. Kuvissa 19 ja 20 on esitetty kaikkien suoritettujen kokeiden liuenneen hapen pitoisuus läpilaskukerran funktiona. Kokeen 1 liuenneen hapen alkupitoisuus oli suurempi kuin muilla, mikä näkyy sen kuvaajasta. Kuvaajien tasoittuminen eri liuenneen hapen pitoisuuteen neljännen laskun jälkeen johtuu erilaisesta veden lämpötilasta kokeissa. Alempi lämpötila nostaa liuenneen hapen kyllästyspitoisuutta. Kaikissa kokeissa kyllästyspitoisuus saavutetaan neljännen laskun jälkeen.



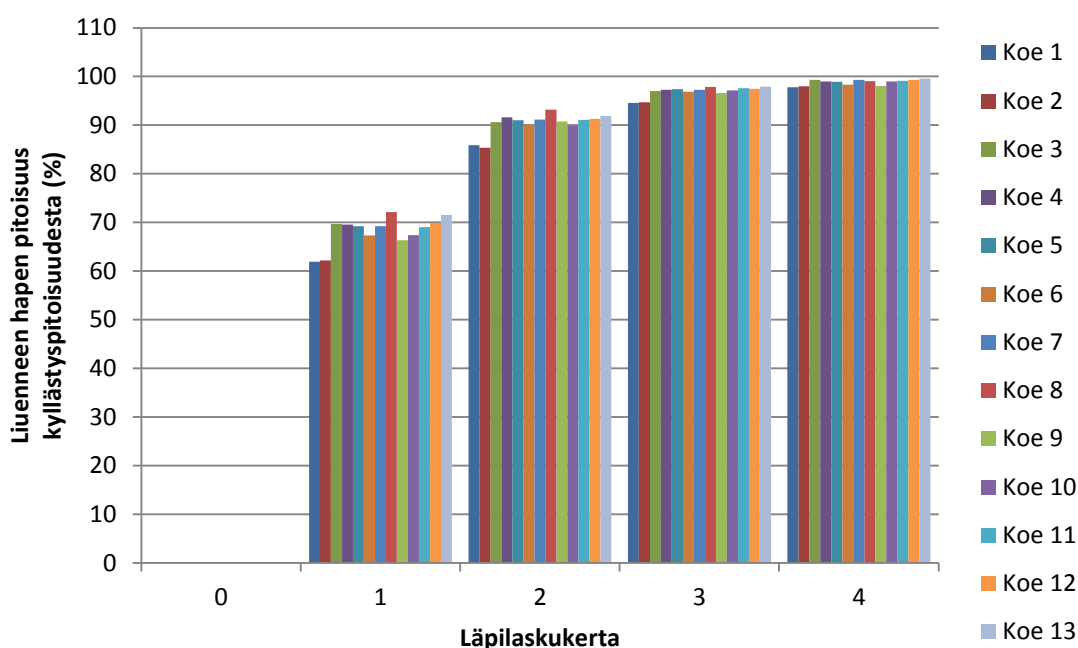
**Kuva 19.** Liuenneen hapen pitoisuus läpilaskukerran funktiona kokeissa 1 – 7.



**Kuva 20.** Liuenneen hapen pitoisuus läpilaskukerran funktiona kokeissa 8-13.



Kuvasta 21 voidaan nähdä, että kaikilla laitteiston kokoonpanoilla happimäärän kasvu vedessä on hyvin samankaltaista. Kuvaa varten jokaisen kokeen läpilaskujen happipitoisuuksista on vähennetty kyseisen kokeen liuenneen hapen alkupitoisuus, jolloin alkukohdaksi jokaiselle on saatu 0 ja arvoja voidaan paremmin verrata toisiinsa. Kahdella ensimmäisellä läpilaskulla kokeiden 1 ja 2 liuenneen hapen pitoisuudet jäävät selkeämmin muista, mutta erot tasoittuvat kahdella seuraavalla laskulla. Erot kokeiden välillä ovat hyvin pieniä ja kyllästyspitoisuus saavutetaan kaikissa kokeissa neljän laskun jälkeen.



**Kuva 21.** Liuenneen hapen prosentuaalinen pitoisuus kyllästyspitoisuudesta läpilaskukertojen funktiona.

### 8.3 Ilmastustehokkuus

Hapetuslaitteen tehokkuutta voidaan arvioida myös energiankulutuksen avulla. Sekä pumppaus- että potentiaalienergian mukaan laskettaessa paras ilmastustehokkuus saavutetaan hapen lisäämisellä (60 l/min). SAE<sub>20</sub> oli tällöin pumppausenergian mukaan laskettuna 0,09 kg/kWh ja potentiaalienergian mukaan laskettuna 1,00 kg/kWh. Molemmat ovat yli 20 % suurempia kuin ilman hapen syöttöä saavutetut ilmastustehokkuudet.

Sassi ja Keto (2005) testasivat kahdeksan ilmastuslaitetta joiden  $SAE_{20}$  vaihteli välillä 0,19 – 1,47 kg/kWh. W-Rix Oy:n (2012) internetsivuilla löytyvien ilmastuslaitteiden ilmastustehokkuus vaihtelee välillä 1,5 – 2,0 kg/kWh. Tässä tutkimuksessa pumppausenergian mukaan laskettu  $SAE_{20}$  on todella pieni, jos sitä verrataan edellä mainittuihin ilmastuslaitteisiin. Tämä johtuu siitä, että varsinainen hapetustapahtuma koelaitteistolla on lyhyt verrattuna pumppausaikaan. Pumppaus kestää noin 12 minuuttia ja veden laskeminen laitteiston läpi, jolloin hapen liukeneminen tapahtuu, kestää vain 25, 30 tai 60 sekuntia. On selvää, että ilmastustehokkuus on tällöin pieni.

Laskettaessa  $SAE_{20}$  potentiaalienergian mukaan on se samaa luokkaa Sassin ja Kedon (2005) tutkimien ilmastuslaitteiden kanssa jääden huonommaksi vain kahdelle laitteelle. Kaikkien W-Rix Oy:n (2012) ilmastuslaitteiden ilmastustehokkuus on suurempi.

## 8.4 Hapensiirtotehokkuus

Kokeiden 10 ja 13  $SOTE_{20}$  on suurempi kuin 100 %, mikä osoittaa, että happea siirtyy paljon muualtakin kuin vain pyörresuppiloon syötetystä ilmasta. Tämä vahvistaa sen, että merkittävä osa hapensiirrosta tapahtuu alasäiliössä, jossa suurella nopeudella tuleva vesi sekoittuu ja ottaa samalla ilmaa mukaansa. Tästä syystä taulukon 9 hapensiirtotehokkuudet eivät kerro todellisuudessa, kuinka tehokkaasti happi siirtyi syötetystä ilmasta tai hapestä. Jos kuitenkin otetaan vertailukohdaksi koe 4, joka tehtiin muuten samalla laitteistokokoonpanolla kuin testit 10 – 13, mutta ilman paineilman tai hapen syöttöä, voidaan todellista hapensiirtotehokkuutta arvioida. Taulukossa 11 on esitetty todellinen  $SOTE_{20}$  kokeille 10 – 13. Taulukossa esitetty  $SOTR_{20}$  on laskettu vähentämällä kokeiden 10 – 13  $SOTR_{20}$ :sta kokeen 4  $SOTR_{20}$ . Tämä jäljelle jäänyt osa on syötetyn ilman tai hapen vaikutuksesta veteen liunneen hapen määrä.

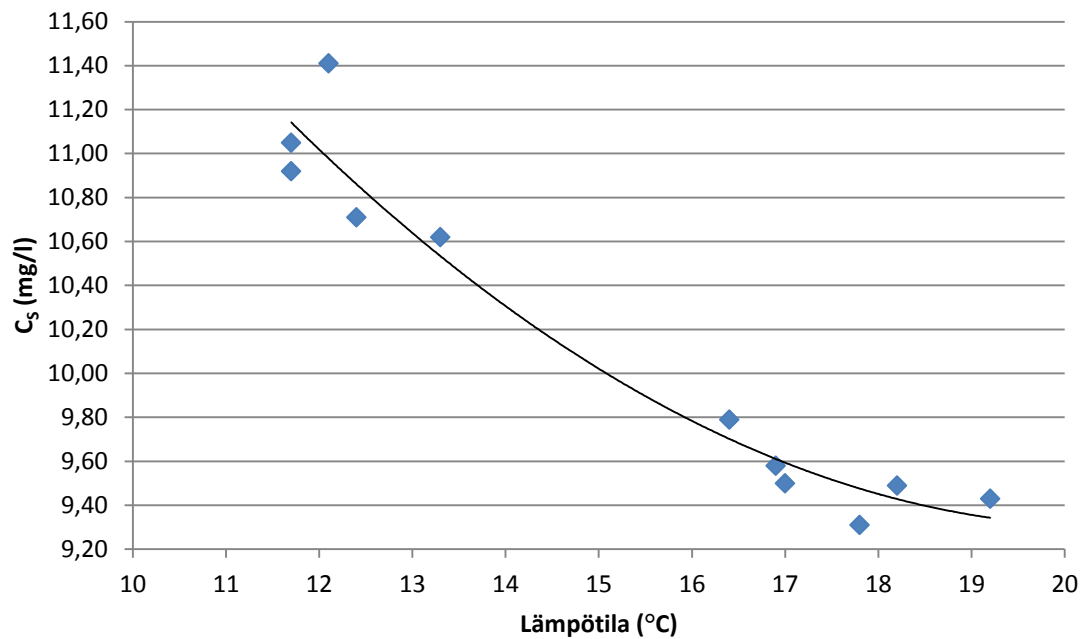
**Taulukko 11.** Kokeiden 10 - 13 todellinen hapensiirtotehokkuus.

Koe	$SOTR_{20}$ (kg/s)	$SOTE_{20}$ (%)
10	0,00005	37,4
11	0,00006	9,9
12	0,00009	7,3
13	0,00003	12,9

Taulukosta 11 voidaan nähdä, että paras hapensiirtotehokkuus saavutetaan ilmalla, kun ilmavirta on 30 l/min. Ilmavirtaa lisättäessä  $SOTE_{20}$  pienenee. Happea lisättäessä  $SOTE_{20}$  on huomattavasti pienempi kuin ilman tapauksessa, mikä kertoo siitä, ettei hapella ole tarpeeksi aikaa liueta veteen. Myös hapen kohdalla  $SOTE_{20}$  pienenee virtausmäärän kasvaessa. Vaikka  $SOTE_{20}$  on happea syötettäessä pienempi kuin ilmalla, saavutetaan hapella kuitenkin parempi  $SOTR_{20}$  sekä  $SAE_{20}$ .

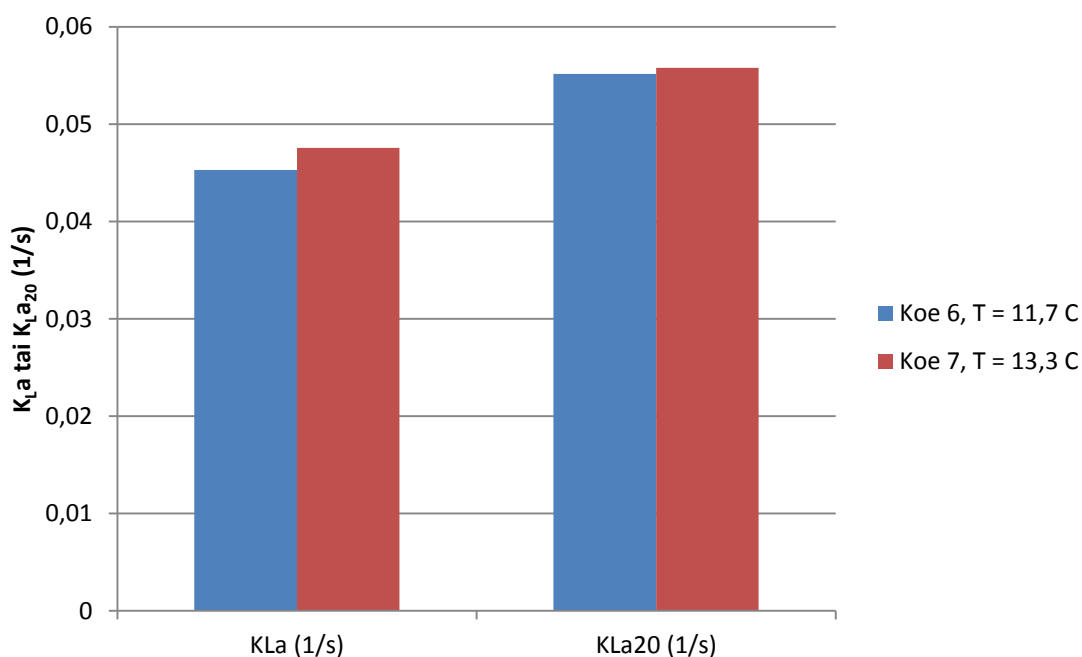
## **8.5 Veden lämpötila, ilmanpaine ja liuenneen hapen kyllästyspitoisuus**

Veden lämpötila vaihteli kokeissa välillä 11,7 – 19,2 °C. ASCE:n (2007) standardin mukaan saa lämpötilavaihtelu yhden testin aikana olla korkeintaan  $\pm 2$  °C. Tutkimuksessa veden lämpötila nousi yhden kokeen aikana 0,2 - 1,1 °C:ta, mikä täyttää standardin vaatimuksen. Veden lämpötilan tulisi pysyä mahdollisimman tasaisena, sillä se vaikuttaa hapen kyllästyspitoisuuteen, joka nousee lämpötilan laskiessa. Tämä voidaan hyvin nähdä kuvasta 22, jossa on esitetty kokeissa saadut liuenneen hapen kyllästyspitoisuudet lämpötilan funktiona. Kuvassa ei ole kokeiden 11 ja 12 kyllästyspitoisuuksia, sillä ne saatiin syötettäessä happea veteen, mikä nostaa kyllästyspitoisuutta. Hapen vaikutusta kyllästyspitoisuuteen käsitellään myöhemmin tässä osiossa. Lämpötilan vaikutus  $C_S$ :ään on otettu huomioon laskettaessa hapensiirtonopeutta korjaamalla se standardiolosuhteisiin yhtälön (26) mukaisesti ASCE:n (2007) ohjeiden mukaan.



**Kuva 22.** Liuenneen hapen kyllästyspitoisuus ( $C_s$ ) lämpötilan funktiona ( $R^2 = 0,95$ ).

Lämpötila vaikuttaa myös  $K_{La}$ :han, mutta kokeessa määritetyt  $K_{La}$ :t on lämpötilakorjattu ASCE:n (2007) standardin mukaisesti 20 °C:een lämpötilaan, jotta tulokset ovat keskenään vertailtavissa.  $K_{La}$ :n lämpötilakorjauksen vaikutus voidaan nähdä hyvin kuvasta 23, jossa on esitetty kokeiden 6 ja 7  $K_{La}$  ja  $K_{La20}$ . Kokeet on valittu kuvaajaan siksi, että niissä on käytetty samaa laitteistokokoonpanoa, mutta veden lämpötila on ollut erilainen. Kokeen 7  $K_{La}$  on suurempi kuin kokeen 6  $K_{La}$ , mutta lämpötilakorjaus pienentää eroa, vaikka kokeen 7  $K_{La20}$  on myös suurempi kuin kokeen 6  $K_{La20}$ . Lämpötilakorjaus tasaa eroja kokonaishapensiirtokertoimissa eri lämpötiloissa samalla laitteistokokoonpanolla suoritetuissa kokeissa ja mahdollistaa kokeiden tulosten vertailun toisiinsa.



**Kuva 23.** Lämpötilakorjauksen vaikutus kokeiden 6 ja 7  $K_{La}$ :han.

Ilmanpaine suoritettujen kokeiden aikana vaihteli välillä 98,56 – 101,36 kPa (739 – 760 mmHg). Lämpötilan tavoin myös ilmanpaine vaikuttaa liuenneen hapen kyllästyspitoisuuteen, mutta sen muutos verrattuna lämpötilaan on yleensä vähäistä ja vaikutus niin ollen pieni. Ilmanpaineen vaikutus on otettu huomioon korjaamalla  $C_s$  standardiolosuhteisiin yhtälön (26) mukaisesti.

Taulukossa 12 on esitetty standardiolosuhteisiin korjatut mitatut kyllästyspitoisuudet sekä taulukosta löytyvät kyllästyspitoisuudet sekä näiden ero.  $C_{S20\text{taulukko}}$  on otettu ASCE:n (2007) standardin taulukosta. Voidaan nähdä, ettei suurimmassa osassa kokeista mitattu kyllästyspitoisuus eroa kovin paljon taulukkoarvosta. Kuitenkin jo 1 % pienempi kyllästyspitoisuus aiheuttaa 3 % suuremman hapensiirtonopeuden (ASCE, 2007). Kaikissa laskuissa onkin käytetty mittaustulosten perusteella epälineaarisella regressiolla määritettyä kyllästyspitoisuutta. Tällä tavoin määritellyt kyllästyspitoisuudet ovat suurempia kuin taulukkoarvot kaikissa muissa kokeissa paitsi ensimmäisessä, jossa se on 1,1 % pienempi.

Kokeiden 11 ja 12 kyllästyspitoisuudet eroavat todella merkittävästi taulukkoarvoista. Näissä kokeissa pyörresuppiloon syötettiin happea, mikä selittää poikkeavat kyllästyspitoisuudet, sillä kyllästyspitoisuus on Henryn lain mukaisesti riippuvainen

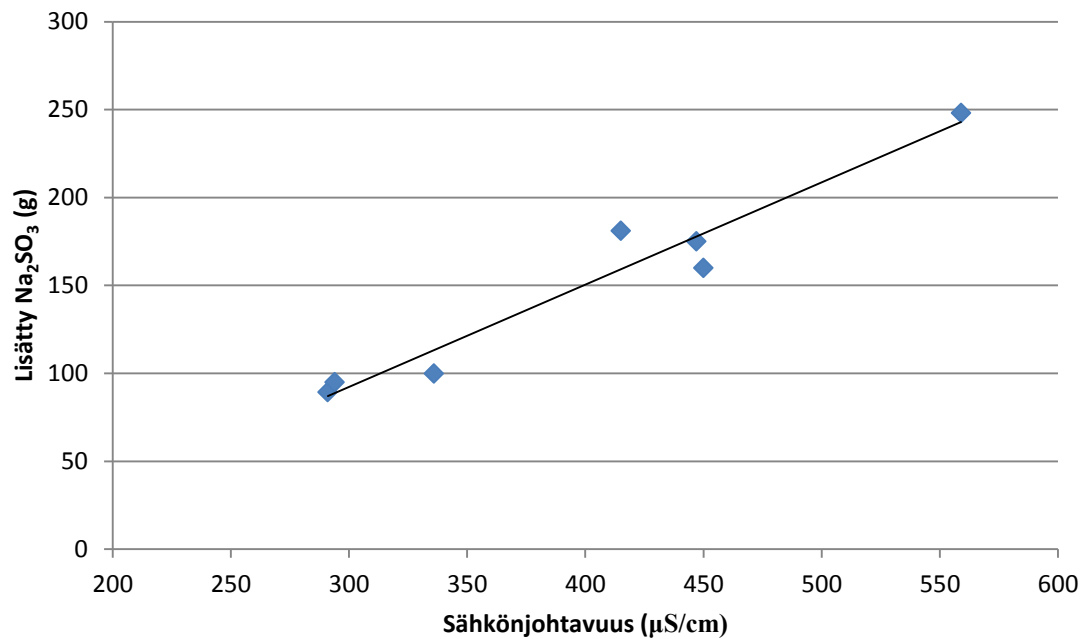
kaasun osapaineesta. Kun ilman sijasta syötetään puhdasta happea, on hapen osapaine noin viisinkertainen ja näin ollen myös kyllästyspitoisuus suurempi.

**Taulukko 12.** Liuenneen hapen kyllästyspitoisuuden mittaus- ja taulukkoarvot sekä niiden ero.

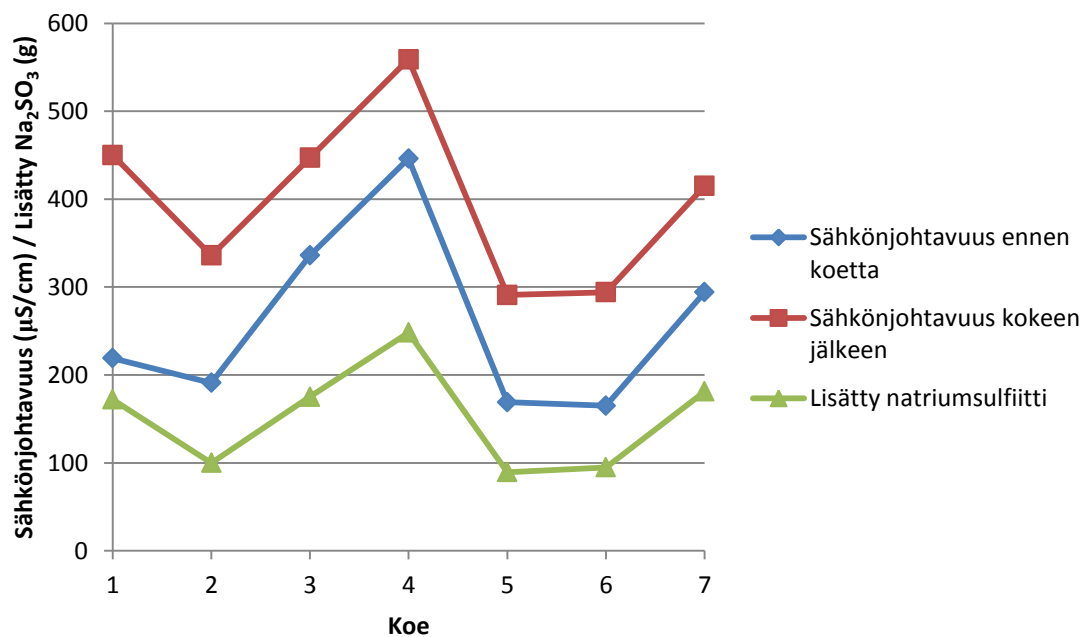
Koe	C <sub>S20</sub> (mg/l)	C <sub>S20</sub> taulukko (mg/l)	Ero (%)
1	8,99	9,09	-1,1
2	9,27	9,09	2,0
3	9,17	9,09	0,9
4	9,18	9,09	1,0
5	9,17	9,09	0,9
6	9,28	9,09	2,1
7	9,36	9,09	3,0
8	9,30	9,09	2,4
9	9,26	9,09	1,9
10	9,52	9,09	4,7
11	10,01	9,09	10,1
12	10,70	9,09	17,7
13	9,16	9,09	0,8

## 8.6 Sähkönjohtavuus ja TDS

Veden sähkönjohtavuus ja TDS ovat korkeampia kokeen lopussa otetussa näytteessä kuin alussa otetussa. Tämä johtuu kemikaalien lisäämisestä, mikä voidaan selkeästi nähdä kuvasta 24, jossa veteen lisätty natriumsulfiittimäärä on esitetty sähkönjohtavuuden funktiona. Kuvassa 25 on vielä esitetty sähkönjohtavuuden muutos ja lisätyn natriumsulfiitin määrä eri kokeissa.



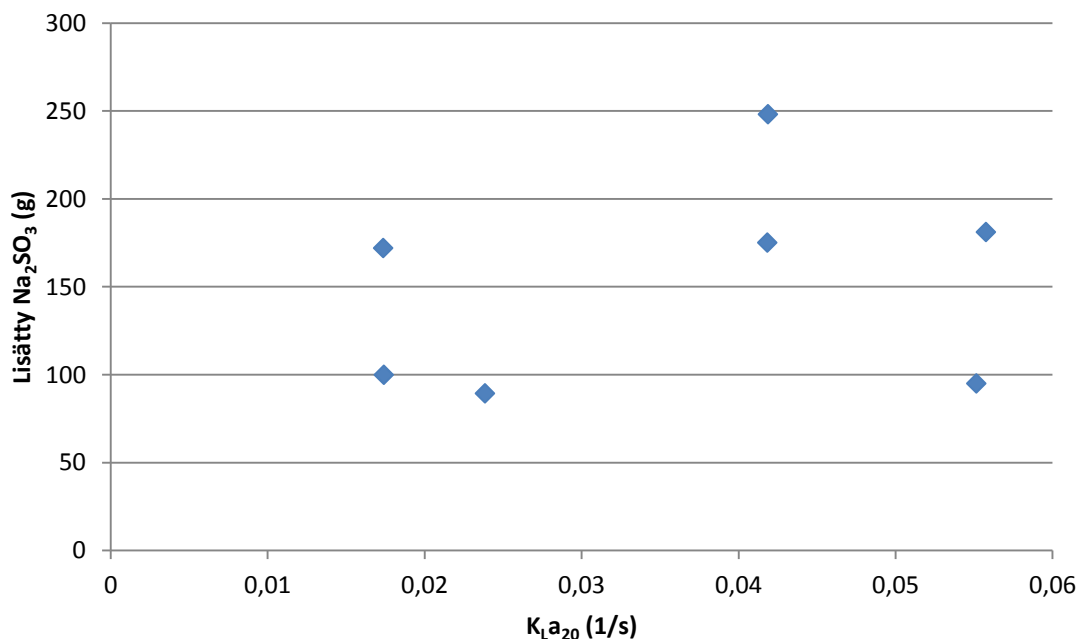
**Kuva 24.** Lisätyn Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>:n määrä sähkönjohtavuuden funktiona ( $R^2 = 0,95$ ).



**Kuva 25.** Sähkönjohtavuuden muutos sekä lisätty Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> eri kokeissa.

ASCE:n standardissa (2007) TDS:lle on määritetty ylärajaksi 2000 mg/l, sillä TDS:n kasvaessa hapensiirtokertoimen on myös havaittu kasvavan. Taulukossa 10 esitettyjen TDS-arvojen perusteella nähdään, ettei 2000 mg/l raja ylity missään vaiheessa. Kokeet 2, 3 ja 4 suoritettiin samalla vedellä johon lisättiin joka kokeen alussa Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>:a ja TDS kokeen 4 lopussa oli 391 mg/l, joka on huomattavasti pienempi kuin sallittu 2000 mg/l. Tämän perusteella voidaan useampien kokeiden tekoa samalla vedellä pitää

hyväksyttävänä eikä sillä ole merkittävää vaikutusta kokonaishapensiirtokertoimeen. Tämä voidaan myös todeta kuvasta 26, jossa lisätty  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  on esitetty  $K_{\text{La}20}$ :n funktiona. Korrelaatiokerroin lisätyn  $\text{Na}_2\text{SO}_3$ :n ja  $K_{\text{La}20}$ :n välillä on 0,26. Koska sähkönjohtavuudella ei havaittu merkittävää vaikutusta hapensiirtonopeuteen, ei sitä mitattu enää seitsemännen kokeen jälkeen.



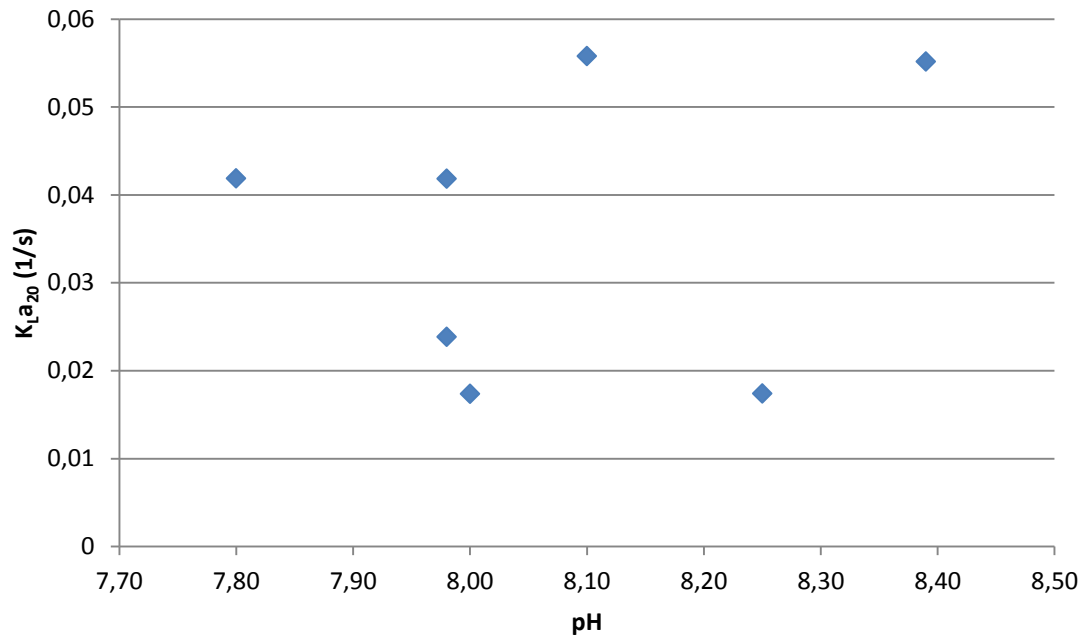
**Kuva 26.** Lisätty  $\text{Na}_2\text{SO}_3$   $K_{\text{La}20}$ :n funktiona.

## 8.7 pH

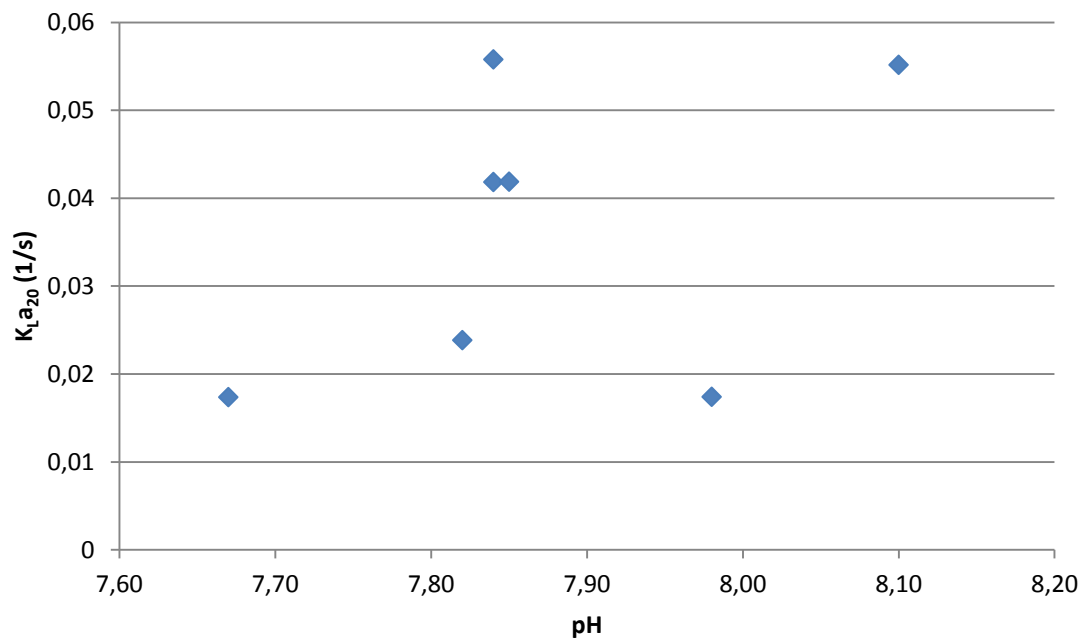
pH:n vaikutusta veden hapetukseen tutkittiin, vaikka kirjallisuudesta ei löytynyt tietoa, että se olisi merkittävä tekijä hapen liukenemisessä. Kuten taulukosta 10 voitiin nähdä, pH laskee jonkin verran kokeen aikana, mutta muutos on kaikissa kokeissa alle 5 %. Koe 4 on poikkeus tästä, sillä siinä pH näyttää hieman nousevan, mutta kyseessä on luultavasti mittausvirhe.

Kuvissa 27 ja 28 on esitetty  $K_{\text{La}20}$  kokeiden alussa ja lopussa mitattujen pH-arvojen funktiona. pH ei näytä vaikuttavan hapensiirtokertoimeen mitenkään, vaan sekä pieniä että suuria  $K_{\text{La}20}$ :n arvoja saadaan riippumatta mitatusta pH:sta. Korrelaatiokerroin alussa mitatun pH ja  $K_{\text{La}20}$  välillä on 0,19 ja lopussa mitatun pH ja  $K_{\text{La}20}$  välillä 0,43. Koska pH:lla ei havaittu vaikutusta hapensiirtonopeuteen, ei sitä mitattu enää seitsemännen kokeen jälkeen.





**Kuva 27.**  $K_{La_{20}}$  kokeiden alussa mitatun pH:n funktiona.



**Kuva 28.**  $K_{La_{20}}$  kokeiden lopussa mitatun pH:n funktiona.

## 8.8 Virhelähteet

Läpilaskuajan mittaaminen oli haastavaa laitteen luonteen takia. Vesi virtasi laitteen läpi nopeasti ja loppumisajankohdan määrittäminen hapetustapahtumalle oli haastavaa. Lisäksi venttiilin aukaiseminen ja kellon käynnistäminen samanaikaisesti aiheutti

ongelmia. Lämpilaskuaikoihin tuleekin suhtautua noin aikoina ja tarkemmalla määrittelyksellä ne voisivat muuttua muutamia sekunteja.

Veden määrä pysyi kokeiden aikana melko samana. ASCE:n (2007) mukaan veden määrän ei tulisi yhden testin aikana muuttua kuin  $\pm 2$  %. Suoritettujen kokeiden aikana vettä roiskui jonkin verran alasäiliöstä, mutta veden pinta ei laskenut alasäiliössä kuin korkeintaan 2 cm kokeen aikana, mikä täyttää edellä mainitun vaatimuksen.

Mahdollinen reagoimaton  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  vedessä voi aiheuttaa ensimmäisellä laskulla pienemmän tuloksen, koska se reagoi lisätyn hapen kanssa. Tämä on kuitenkin epätodennäköistä, sillä  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  sekoitettiin veteen niin, että liuenneen hapen pitoisuus oli tasaisesti laskenut kaikkialla säiliössä. Tämän jälkeen vesi vielä pumpattiin yläsäiliöön, mikä antoi lisää aikaa kaikelle  $\text{Na}_2\text{SO}_3$ :lle reagoida. Veden liuenneen hapen pitoisuus mitattiin myös vielä yläsäiliöstä ennen ensimmäistä laskua. Ensimmäisellä pumppauksella veden liuenneen hapen pitoisuuden havaittiin nousevan noin 0,4 – 0,5 mg/l, mikä kertoo, että kaikki  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  on reagoanut.

Mittauspisteiden pieni määrä on syytä huomioida. Veden hapettuminen tapahtui todella nopeasti ja kyllästyspitoisuus saavutettiin noin neljän laskun jälkeen. Ensimmäisen laskun jälkeen liuenneen hapen pitoisuus vedessä oli jo noin 70 % kyllästyspitoisuudesta ja toisella laskulla saavutettiin jo yli 90 % pitoisuus. ASCE:n (2007) mukaan liuenneen hapen pitoisuus noin 85 %:iin asti kyllästyspitoisuudesta on merkityksellinen  $K_{LA}$ :n arvioinnissa, kun taas yli 90 % liuenneen hapen pitoisuus kyllästyspitoisuudesta on merkityksellinen  $C_S$ :n arvioinnissa. Mittauspisteet tulisikin jakaa niin, että kaksi kolmasosaa on hapetuskäyrän nousevalla osalla ( $< 86$  % kyllästyspitoisuudesta) ja yksi kolmasosa käyrän tasoittuvalla osalla (86 % - 98 % kyllästyspitoisuudesta), tai mikäli mittauspisteitä on yli 21, ne voidaan jakaa tasaisesti (ASCE, 2007). Tässä tutkimuksessa käyrän nousevalle osalle saatiin vain yksi mittauspiste ja tasoittuvalle osalla 3 tai 4. Tämä ei täytä ASCE:n (2007) vaatimuksia, mutta tälle ei voi mitään vaan se on ominaista testattavalle laitteelle ja koelaitteistolle.

Mittausdatan analysoinnissa on käytetty epälineaarista regressioanalyysiä. Kokeita tehtäessä vesi pumpattiin yläsäiliöön ja tämän havaittiin hapettavan vettä ensimmäisellä pumppauskerralla ennen ensimmäistä laskua niin, että liuenneen hapen pitoisuus vedessä nousi noin 0,5 mg/l. Seuraavilla pumppauskerroilla eroa alasäiliöstä mitattuun

liuenneen hapen pitoisuuden arvoon saattoi olla 0,05 mg/l. Tämä pumppauksen vähäinen vaikutus hapensiirtoon on mukana epälineaarilla regressioanalyysillä määritetyissä tuloksissa.

## 9 Johtopäätökset

Tämän hetkissä kunnossa tutkimuksen kohteena ollut hapetuslaite ei toimi suunnitellulla tavalla. Laitteen ejektori-imua ei saatu syntymään kuin kuristamalla virtausta ennen pyörresuppiloa, mikä sotki ja pienensi virtausta laitteella. Poretasoa ja käyräsuutinta voitiin testata, mutta niiden vaikutus hapetukseen on tulosten perusteella kyseenalainen.

Paineilman lisääminen veteen ei aiheuttanut huomattavaa parannusta hapensiirtonopeudessa, mikä kertoo siitä, ettei viipymäaika hapen liukenemiseen hapetuslaitteistolla ole tarpeeksi pitkä, vaikka ilma syötettäisiin putkeen heti yläsäiliön lähdöstä. Hapen syöttäminen pyörresuppiloon paransi hapensiirtonopeutta enemmän kuin ilman syöttö. Parannus ei kuitenkaan ollut niin suuri, että hapensiirtonopeus olisi ylittänyt tyhjällä putkella tehdyissä kokeissa saavutetut tulokset.

Hapetuslaitetta testatulla koelaitteistolla merkittävä osa hapen liukenemisestä vaikuttaa tapahtuvan aläsäiliössä, minne vesi suihkuu vapaasti putkesta hapetuslaitteen läpi kuljettuaan. Tämä voidaan todeta kokeiden 6 ja 7 tuloksista, jotka saatiin laskemalla vesi tyhjää putkea pitkin aläsäiliöön. Lisäksi tämä voidaan nähdä hyvin tarkastelemalla läpilaskuaikaa ja hapensiirtonopeutta: läpilaskuajan pienentyessä (eli virtausnopeuden kasvaessa) hapensiirtonopeus kasvaa. Tällöin aläsäiliöön suihkuavalla vedellä on eniten liike-energiaa ja sekoittuminen aläsäiliössä on voimakkainta. Myös kokeiden 10 ja 13 ilmastustehokkuus, joka oli suurempi kuin 100 % syötettäessä paineilmaa pyörresuppiloon, kertoo, että happea siirtyy paljon muualta kuin syötetystä paineilmosta. Tämä on syytä pitää mielessä tuloksia tarkasteltaessa ja hapetuslaitteen suorituskkyä arvioitaessa.

Tutkimuksessa vesi laskettiin laitteen läpi vain yhdellä nopeudella tietyllä laitteistokokoonpanolla eikä nopeuden vaikutusta hapetustehoon tämän takia voitu selvittää. Suoritetuissa kokeissa nopeuden kasvu paransi hapensiirtonopeutta, mutta tällöin laitteistokokoonpano oli erilainen eikä vertailu suoraan ollut mahdollista. Virtausnopeus vaikuttaa veden viipymäaikaan laitteella sekä ejektori-imuun, jota ei tosin saatu prototyypin kohdalla toimimaan. Viipymäaika vaikuttaa suoraan hapensiirtonopeuteen, joten nopeuden pienentyessä ja viipymäajan kasvaessa hapetusteho saattaisi parantua. Toisaalta veden virtausnopeus vaikuttaa suoraan

syntyvään ejektori-imuun, joka pienemmillä virtausnopeuksilla olisi pienempi ja ilmaa/hapetta ei imettäisi veteen niin paljon kuin suuremmilla virtausnopeuksilla. Tutkimalla samaa laitteistokokoonpanoa eri virtausnopeuksilla näiden kahden (viipymäaika ja ejektori-imu) tekijän vaikutus voitaisiin selvittää.

Verrattaessa tuloksia muihin ilmastuslaitteisiin on syytä ottaa huomioon tutkimuksessa testatun laitteen erityisrakenne. Suurin osa muista ilmastuslaitteista on altaisiin asennettavia, kun taas tämän tutkimuksen laite on putkeen asennettava. Suora vertaaminen muihin laitteisiin ei välttämättä olekaan mielekästä, vaan on syytä huomioida mihin ja minkälaisessa prosessissa ilmastuslaitetta on tarkoitus käyttää. Putkeen asennettava ilmastuslaite saattaa olla monissa tapauksissa mielekkäämpi vaihtoehto suurelle altaaseen asennettavalle ilmastuslaitteistolle.

Tutkimuksen tuloksia tarkasteltaessa täytyy muistaa, että saadut tulokset pätevät vain käytettyä tutkimuslaitteistoa vastaavissa olosuhteissa. Mikäli laitteistokokonaisuus, mukaan lukien säiliöt ja putkisto, muuttuu, ei tutkimuksen tuloksia voi suoraan siirtää uuteen ympäristöön. Tämän takia on oltava erittäin tarkka tehtäessä johtopäätöksiä laitteen soveltuvuudesta ja suorituskyvystä tämän tutkimuksen laitteistokokonaisuudesta olennaisesti eroaviin kohteisiin.

## 10 Yhteenveto

Tässä tutkimuksessa testattiin Happihyrrä Oy:n kehittämää veden hapetuslaitteen prototyyppiä. Tarkoituksena oli todentaa laitteen toimintaperiaate ja mitata sen suorituskky. Ennen kokeiden aloittamista perehdyttiin kirjallisuuden avulla hapensiirron teoriaan sekä ilmastuslaitteiden suorituskvyn mittaamiseen.

Hapetuslaitteen prototyyppi koostui pyörresuppilosta, pyörteenhajottimesta, käyräsuuttimesta ja poretasosta. Pyörresuppilo, pyörteenhajotin ja käyräsuutin rakennettiin akryylimuoviputkesta, jonka sisähalkaisija oli 100 mm. Käyräsuuttimen toinen pää oli taivutettu 45 asteen kulmaan ja kuristettu niin, että sisähalkaisija oli 50 mm. Poretaso oli 550x550 mm:n levy akryylimuovista ja alumiinista. Pyörresuppilon ja pyörteenhajottimen ejektoriputket olivat akryylimuovia ja pyörteenhajottimen sisäelementit alumiinia. Pyörresuppilossa oli liitäntä kaasuletkulle. Laitteen hapetusteho perustuu pyörresuppilossa aikaan saatavaan ejektori-imuun ja pyörteeseen, joka hajotetaan pyörteenhajottimessa useaksi pienemmäksi pyörteeksi. Tämän jälkeen vesi kuplitetaan poretasossa.

Hapetuskokeet suoritettiin Oulun yliopistolla koehalliin rakennetulla testilaitteistolla, joka koostui kahdesta 1 m<sup>3</sup> muovisäiliöstä, joista toinen oli lattiatasolla ja toinen hallin ylätasolla, sekä näiden väliin rakennetusta venttiilillä varustetusta teräsputkesta, jonka toiseen päähän ennen alasäiliötä testattavan laitteen prototyyppi asennettiin. Alasäiliössä oli uppopumppu veden pumppaamiseen yläsäiliöön. Kokeissa käytettiin 1000 l puhdasta vettä, josta liuennut happi poistettiin natriumsulfiitilla, minkä jälkeen vesi laskettiin laitteen läpi yläsäiliöstä alasäiliöön. Läpilaskuaika oli laitteistokokoonpanosta riippuen 25 – 60 sekuntia. Liuennut happi mitattiin yläsäiliöstä ennen läpilaskua ja alasäiliöstä läpilaskun jälkeen. Läpilaskuja tehtiin kunnes veden happipitoisuus saavutti kyllästyspitoisuuden. Saadun datan perusteella hapensiirtonopeus laskettiin käyttäen hyväksi epälineaarista regressioanalyysiä. Ilmastustehokkuus määritettiin pumppaus- ja potentiaalienergian avulla ja hapensiirtotehokkuus ilma- ja happivirtojen avulla.

Kaikilla testatuilla laitteistokokoonpanoilla happipitoisuuden kasvu vedessä oli samankaltaista ja liuenneen hapen kyllästyspitoisuus saavutettiin neljän läpilaskun jälkeen. Paras hapensiirtonopeus saavutettiin laskemalla vettä tyhjää putkea pitkin alasäiliöön. Tällöin hapensiirtonopeus oli 45,1 kg/d. Lisäämällä happea (60 l/min)

veteen kaasunjakoreenkaan kautta, saatiin hapensiirtonopeudeksi 41,0 kg/d. Tämä jäi 9 % tyhjällä putkella saavutetusta hapensiirtonopeudesta. Kun hapensiirtotehokkuus laskettiin ottamalla vertailu kohdaksi koe 4, saatiin paras hapensiirtotehokkuus paineilman syötöllä (30 l/min), jolloin  $SOTE_{20}$  oli 37,4 %.

Paineilman ja hapen lisääminen veteen paransi hapensiirtonopeutta verrattuna ilman paineilman tai hapen syöttöä tehtyihin kokeisiin. Hapen syöttö paransi hapensiirtonopeutta 23,5 % ja ilman syöttö 12,7 %. Tarkasteltaessa paineilmalla tehtyjen kokeiden hapensiirtotehokkuutta havaittiin, että merkittävä määrä veteen liuenneesta hapesta siirtyy muualta kuin syötetystä ilmasta. Tämä vahvisti aiemmat epäilyt siitä, että merkittävä osuus hapensiirrosta tapahtuu alasäiliössä, minne vesi suihkuu laitteistolta suurella nopeudella.

Sähkönjohtavuus ja pH mitattiin ensimmäisessä seitsemässä testissä eikä niillä havaittu vaikutusta hapensiirtonopeuteen. Kemikaalien lisääminen nosti sähkönjohtavuutta, mutta ei niin merkittävästi, että sillä olisi ollut vaikutusta hapensiirtonopeuteen.

Saaduista tuloksista huolimatta hapetuslaite ei nykyisessä kunnossa toimi suunnitellulla tavalla. Ejektori-imua ei saatu tutkimuksen aikana toimimaan vaan ejektorit suihkuttivat vettä ulos. Kuristamalla putkea ennen laitetta ejektori-imu saatiin aikaan, mutta kuristus sotki ja pienensi veden virtausta laitteella. Paineilmaa ja happea voitiin tästä huolimatta lisätä veteen pyörresuppilon kaasunjakoreenkaan kautta. Kuitenkin merkittävä osuus hapen liukenemisesta testilaitteistolla tapahtuu alasäiliössä eikä hapetuslaitteella ole siihen merkitystä.

Tutkitun hapetuslaitteen vertaaminen suoraan muihin ilmastuslaitteisiin ei välttämättä ole mielekästä laitteen erikoisesta rakenteesta johtuen. Putkeen asennettava ilmastuslaite saattaa monessa tapauksessa olla mielekkäämpi vaihtoehto suuremmille altaisille asennettaville laitteistoille. On myös syytä huomioida, että tutkimuksen tulokset ovat päteviä vain tutkimuslaitteistoa vastaavissa olosuhteissa. Mikäli olosuhteet muuttuvat olennaisesti, ei tuloksien perusteella voi tehdä suoria johtopäätöksiä laitteen suorituskyvystä tai soveltuvuudesta kyseisiin olosuhteisiin.

## 11 Lähdeluettelo

2004/42/EY. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 21.4.2004 orgaanisten liuottimien käytöstä tietyissä maaleissa ja lakoissa sekä ajoneuvojen korjausmaalaustuotteissa aiheutuvien haihtuvien orgaanisten yhdisteiden päästöjen rajoittamisesta. EUVL n:o 143, 30.4.2004, s. 87-96. Saatavissa: <http://eur-lex.europa.eu/fi/index.htm> [viitattu 5.12.2012].

Abulfaraj W H & Mamoon A M, 1995. Factors affecting radon removal from Rn-222 enriched water. *Applied Radiation and Isotopes*, 46 (6-7), s. 609-610.

Aiba S & Toda K, 1963. Effect of surface active agent on oxygen absorption in bubble aeration I. *Journal of General and Applied Microbiology*, 9 (4), s. 443-453.

APHA, AWWA & WPCF, 1976. Standard methods for the examination of water and wastewater. 14. painos. Washington: APHA.

ASCE, 2007. Measurement of oxygen transfer in clean water. Reston: American Society of Civil Engineers. Saatavissa: <http://site.ebrary.com/> [viitattu 5.12.2012].

AWWA, 2010. Water Treatment. 4. painos. Denver: American Water Works Association. Saatavissa: <http://site.ebrary.com/> [viitattu 5.12.2012].

Backman R C, Blanc F C, Siino F J & O'Shaughnessy J C, 1988. Chemical enhancement and depression of oxygen transfer in industrial wastewaters, teoksessa: *Proceedings of the 42nd industrial waste conference*, May 12-14 1987, Purdue university, West Lafayette, Indiana. Chelsea: Lewis Publishers, Inc., s. 525-540. Saatavissa: <http://e-archives.lib.purdue.edu/> [viitattu 5.12.2012].

Backman R C, O'Shaughnessy J C & Siino F J, 1987. Evaluation of oxygen transfer parameters for industrial wastewaters, teoksessa: *Proceedings of the 41st industrial waste conference*, May 13-15 1986, Purdue University, West Lafayette, Indiana. Chelsea: Lewis Publishers, Inc., s. 234-241. Saatavissa: <http://e-archives.lib.purdue.edu/> [viitattu 5.12.2012].



Bahadori A & Vuthaluru H B, 2010. Simple Arrhenius-type function accurately predicts dissolved oxygen saturation concentrations in aquatic systems. *Process safety and environmental protection*, 88 (5), s. 335-340.

Bass S J & Shell G L, 1978. Evaluation of oxygen transfer coefficients of complex wastewaters, teoksessa: *Proceedings of the 32nd industrial waste conference*, May 10-12 1977, Purdue University, Lafayette, Indiana. Ann Arbor: Ann Arbor Science Publishers Inc., s. 953-967. Saatavissa: <http://e-archives.lib.purdue.edu/> [viitattu 5.12.2012].

Benedek A, 1971. Problems with the use of sodium sulfite in aerator evaluation, teoksessa: *Proceedings of 26th industrial waste conference*, May 4-6 1971, Purdue University, Lafayette, Indiana. s. 947-956. Saatavissa: <http://e-archives.lib.purdue.edu/> [viitattu 5.12.2012].

Benson B B & Krause D J, 1984. The concentration and isotopic fractionation of oxygen dissolved in freshwater and seawater in equilibrium with the atmosphere. *Limnology and Oceanography*, 29 (3), s. 620-632.

Binnie C, Kimber M & Smethurst G, 2006. *Basic water treatment*. 3. painos. London: Thomas Telford Publishing.

Boyle W C, Berthouex P M & Rooney T C, 1973. Pitfalls in parameter estimation for oxygen transfer data, teoksessa: *Proceedings of the 28th industrial waste conference*, May 1-3 1973, Purdue University, Lafayette, Indiana. s. 645-660. Saatavissa: <http://e-archives.lib.purdue.edu/> [viitattu 5.12.2012].

Brown A M, 2001. Nonlinear regression analysis of data using a spreadsheet. *American Biotechnology Laboratory*, 19, s. 58-60. Saatavissa: <http://matesup.italca.cl/modelos/articulos/b0110bro.pdf> [viitattu 5.12.2012].

Chern J-M, Chou S-R & Shang C-S, 2001. Effects of impurities on oxygen transfer rates in diffused aeration systems. *Water Research*, 35 (13), s. 3041-3048.

Colt J, 1984. Computation of dissolved gas concentrations in water as functions of temperature, salinity, and pressure. Bethesda, Maryland: American Fisheries Society.

Colt J, Watten B & Pfeiffer T, 2012. Carbon dioxide stripping in aquaculture. Part 1: Terminology and reporting. *Aquacultural Engineering*, 47, s. 27-37.

Danckwerts P V, 1951. Significance of Liquid-Film Coefficients in Gas Absorption. *Industrial and Engineering Chemistry*, 43 (6), s. 1460-1467.

Dyksen J E, 2005. Aeration and air-stripping, teoksessa: Baruth E E (toim.), *Water treatment plant design*. 4. painos. New York: McGraw-Hill, s. 5.1-5.25.

Eckenfelder W W J, 2000. *Industrial water pollution control*. 3. painos. Singapore: McGraw-Hill.

Gilbert R G, 1979. Measurement of alpha and beta factors, teoksessa: Boyle W C (toim.), *Proceedings: Workshop toward an oxygen transfer standard*, April 11-14 1978, Asilomar conference grounds, Pacific Grove, California. Cincinnati: EPA. s. 147-162. Saatavissa: <http://books.google.fi/> [viitattu 5.12.2012].

Gillot S, Capela S & Heduit A, 2000. Effect of horizontal flow on oxygen transfer in clean water and in clean water with surfactants. *Water Research*, 34 (2), s. 678-683.

Haynes W M (toim.), 2012. *CRC Handbook of Chemistry and Physics*. 93. painos (Internet Version 2013). Boca Raton, FL: CRC Press/Taylor and Francis. Saatavissa: <http://www.hbcpnetbase.com/> [viitattu 5.12.2012].

Hébrard G, Destrac P, Roustan M, Huyard A & Audic J M, 2000. Determination of the water quality correction factor alpha using a tracer gas method. *Water Research*, 34 (2), s. 684-689.

Housecroft C E & Sharpe A G, 2012. *Inorganic Chemistry*. 4. painos. Harlow, England: Pearson Education Limited.

Hug S J & Leupin O, 2003. Iron-catalyzed oxidation of arsenic(III) by oxygen and by hydrogen peroxide: pH-dependent formation of oxidants in the Fenton reaction. *Environmental Science & Technology*, 37 (12), s. 2734-2742.

Hu Y, Ni Q, Wu Y, Zhang Y & Guan C, 2011. Study on CO<sub>2</sub> removal method in recirculating aquaculture waters. *Procedia Engineering*, 15, s. 4780-4789.

Jamnongwong M, Loubiere K, Dietrich N & Hébrard G, 2010. Experimental study of oxygen diffusion coefficients in clean water containing salt, glucose or surfactant: Consequences on the liquid-side mass transfer coefficients. *Chemical Engineering Journal*, 165 (3), s. 758-768.

Kepenyes J & Váradi L, 1984. Aeration and oxygenation in aquaculture, teoksessa: *Inland Aquaculture Engineering*, ADCP/REP/84/21. Rome: FAO. Saatavissa: <http://www.fao.org/> [viitattu 5.12.2012].

Lappalainen K M & Lakso E, 2005. Järven hapetus, teoksessa: Ulvi T & Lakso E (toim.), YO114 Järvien kunnostus. Helsinki: Suomen ympäristökeskus, s. 151-168. Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/> [viitattu 5.12.2012].

Leu H G, Lin S H, Shyu C C & Lin C M, 1998. Effects of surfactants and suspended solids on oxygen transfer under various operating conditions. *Environmental Technology*, 19 (3), s. 299-306.

Leupin O X & Hug S J, 2005. Oxidation and removal of arsenic(III) from aerated groundwater by filtration through sand and zero-valent iron. *Water Research*, 39 (9), s. 1729-1740.

Lewis W K & Whitman W G, 1924. Principles of Gas Absorption. *Industrial and Engineering Chemistry*, 16 (12), s. 1215-1220.

Littlejohns J V & Dauglis A J, 2007. Oxygen transfer in a gas-liquid system containing solids of varying oxygen affinity. *Chemical Engineering Journal*, 129, s. 67-74.

Mamoon A, Gomma M A & Sohsah M, 2004. Laboratory scale studies on mitigation of high  $^{222}\text{Rn}$  concentrations in air and water. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 213, s. 766-769.

Mancy K H & Okun D A, 1960. Effects of surface active agents on bubble aeration. *Journal Water Pollution Control Federation*, 32 (4), s. 351-364.

Martín M, Montes F J & Galán M A, 2008. On the contribution of the scales of mixing to the oxygen transfer in stirred tanks. *Chemical Engineering Journal*, 145 (2), s. 232-241.

Metcalf & Eddy, 2003. *Wastewater engineering: treatment and reuse*. 4. painos. Boston: McGraw-Hill.

Mueller J A & Boyle W C, 1988. Oxygen transfer under process conditions. *Journal Water Pollution Control Federation*, 60 (3), s. 332-341.

Muurinen A & Kuoppamäki R, 1977. Ilmastustehon mittaus merkkiainemenetelmällä. Helsinki: Yhdyskuntien vesi- ja ympäristöprojekti, YVY 33.

Otoski R M, Brown L C & Gilbert R G, 1979. Bench and full scale tests for alpha and beta coefficient variability determination, teoksessa *Proceedings of the 33rd industrial waste conference*, May 9-11 1978, Purdue University, Lafayette, Indiana. Ann Arbor: Ann Arbor Science Publishers Inc., s. 835-852.

Oulun vesi, 2012. Talousveden laatu kuukausittain. Saatavissa: <http://www.oulunvesi.fi/index.asp> [viitattu 27.11.2012].

Painmanakul P & Hébrard G, 2008. Effect of different contaminants on the alpha-factor: Local experimental method and modeling. *Chemical Engineering Research and Design*, 86 (11), s. 1207-1215.

Painmanakul P, Loubière K, Hébrard G, Mietton-Peuchot M & Roustan M, 2005. Effect of surfactants on liquid-side mass transfer coefficients. *Chemical Engineering Science*, 60 (22), s. 6480-6491.

Pelkonen M & Larikka H, 1988. Ilmastuksen prosessiparametrit jäteveden käsittelyssä - määrittäminen ja vaikutus energian kulutukseen. Otaniemi, Espoo: Teknillinen korkeakoulu, Vesihuolotekniikan laboratorio, Julkaisu 2.

Pelkonen M & Larikka H, 1989. Aktiivilieteprosessin hapensiirron mallintaminen poistokaasumittauksen avulla. Otaniemi, Espoo: Teknillinen korkeakoulu, Vesihuolotekniikan laboratorio, Julkaisu 4.

Pro Oxygen, 2011. CO<sub>2</sub> Now. Saatavissa: <http://co2now.org> [viitattu 7.12 2012].

Ramalho R S, 1977. Introduction to wastewater treatment processes. New York, London: Academic Press.

RIL, 2003. RIL 124-1 Vesihuolto I. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto.

RIL, 2004. RIL 124-2 Vesihuolto II. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto.

Rosen M J, 2004. Surfactants and interfacial phenomena. 3. painos. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc.. Saatavissa: <http://site.ebrary.com/> [viitattu 7.12.2012].

Rosso D, 2005. Mass transfer at contaminated bubble interfaces. Thesis (PhD). University of California.

Rosso D, Huo D L & Stenstrom M K, 2006. Effects of interfacial surfactant contamination on bubble gas transfer. Chemical Engineering Science, 61 (16), s. 5500-5514.

Rosso D & Stenstrom M K, 2006. Surfactant effects on alpha-factors in aeration systems. Water Research, 40 (7), s. 1397-1404.

Salonen L, Turunen H, Mehtonen J, Mjönäs L, Hagberg N, Wilken R-D & Raff O, 2002. Removal of radon by aeration: Testing of various aeration techniques for small water works. STUK-A193. Helsinki: Dark Oy. Saatavissa: <http://www.stuk.fi/> [viitattu 7.12.2012].

Sassi J & Keto A, 2005. Järvien kunnostusmenetelmät. Hapetuslaitteiden laboratorio- ja kenttäkokeet. VTT Tiedotteita 2307. Espoo: VTT. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/index.jsp> [viitattu 7.12.2012].

Sincero A P & Sincero G A, 2003. Physical-chemical treatment of water and wastewater. London: Iwa Publishing.

Singer P C & Reckhow D A, 2011. Chemical oxidation, teoksessa: Edzwald J K (toim.), Water quality & treatment: A handbook on drinking water. New York: McGraw-Hill, s. 7.1-7.52. Saatavissa: <http://www.dawsonera.com/> [viitattu 7.12.2012].

Sommerfeld E O, 1999. Iron and manganese removal handbook. Denver: American Water Works Association.

Stenstrom M K & Gilbert R G, 1981. Review paper: Effects of alpha, beta and theta factor upon design, specification and operation of aeration systems. Water Research, 15 (6), s. 643-654.

Stenstrom M K & Hwang H J, 1980. The effect of surfactants on industrial aeration systems, teoksessa: Proceedings of the 34th industrial waste conference, May 8-10 1979, Purdue University, Lafayette, Indiana. Ann Arbor: Ann Arbor Science Publishers Inc., s. 902-909.

Treybal R E, 1968. Mass-transfer operations. 2. painos. New York: McGraw-Hill.

USEPA, 1991. Hydrogen sulfide corrosion in wastewater collection and treatment systems. Technical report 430/09-91-010. Washington: US Environmental Protection Agency. Saatavissa: <http://www.epa.gov/nscep/index.html> [viitattu 7.12.2012].

USEPA, 2002. Oxidation of Arsenic(III) by Aeration and Storage. EPA/600/R-01/102. Cincinnati: US Environmental Protection Agency. Saatavissa: <http://www.epa.gov/nscep/index.html> [viitattu 7.12.2012].

W-Rix Oy, 2012. Tuotteet. Parainen: W-Rix Oy. Saatavissa: <http://www.waterix.fi/pages/etusivu/tuotteet.php> [viitattu 10.12.2012].

WPCF & ASCE, 1988. Aeration: A wastewater treatment process. WPCF Manual of practice FD-13. ASCE Manuals and reports on engineering practice No. 63. Water Pollution Control Federation & American Society of Civil Engineers.

Zieminski S, Caron M M & Blackmore R B, 1967. Behaviour of air bubbles in dilute aqueous solutions. *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, 6 (2), s. 233-242.